

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie

Zaměření Tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

**Využití teplotního pole pro analýzu deformace na výlisku z plechu**

**Using field of temperature for analysis of deformation on stamping from metal sheet**

Jan Wimmer

**KSP – TP – 779**

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Sobotka

**Rozsah práce a příloh:**

**Počet stran** 88

**Počet tabulek** 25

**Počet příloh** 4

**Počet obrázků** 96

**Datum:** 25.5.2007



## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení	<b>Jan W I M M E R</b>
Studijní program	<b>M 2301 Strojní inženýrství</b>
Obor	<b>2303T002 Strojírenská technologie</b>
Zaměření	<b>Tváření kovů a plastů</b>

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na  
téma:

### **Využití teplotního pole pro analýzu deformace na výlisku z plechu**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznámení se s problematikou tažení výlisků.
2. Základní metody analýzy deformace při tváření výlisků z plechů.
3. Základy měření teploty, tepla, infradiace a teplotního pole.
4. Experimentální zjištění rozložení teplotního pole při zatěžování vzorku jednoosým tahem.
5. Experimentální zjištění rozložení teplotního pole na vzorcích při tribologickém testu protahováním pásku.
6. Experimentální zjištění rozložení teplotního pole na výlisku jednoduchého rotačního tvaru.
7. Nalezení vzájemných vztahů mezi deformací výlisku a naměřeným teplotním polem.
8. Závěr.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva cca 50 stran
- grafické práce

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- /1/ TMĚJ, J. – MIKEŠ, V.: Teorie tváření, skript VŠST, Liberec 1981
- /2/ BOLJANOVIC, V.: Sheet Metal Forming Processes and Die Design, New York 2004, ISBN 0-8311-3182-9
- /3/ KLEČKOVÁ, M.: Nestacionární teplotní pole a napjatost ve strojních částech, SNTL Praha, 1979
- /4/ KUNEŠ, J.: Modelování tepelných procesů, SNTL Praha, 1989
- /5/ PTÁČEK, J. A KOL.: Měření teploty v průmyslu, Dům techniky ČSVTS Praha, 1993
- /6/ PAVELEK, M. - JANOTKOVÁ, E. - ŠTĚTINA, J.: Vizualizační a optické měřicí metody, VUT v Brně, 2001

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Sobotka

L. S.

doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
vedoucí katedry

doc. Ing. Petr Louda, CSc.  
děkan

V Liberci dne 15.2. 2007

---

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data ( v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

# ANOTACE

## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství  
Diplomant: Jan Wimmer  
Téma práce: Využití teplotního pole pro analýzu deformace na výlisku z plechu  
Usage field of temperature for deformation analysis on stamping from metal plate  
  
Číslo DP: KSP – TP – 779  
Vedoucí DP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.  
Konzultant DP: Ing. Jiří Sobotka

### Abstrakt:

Tato diplomová práce si klade za cíl popsat spojitost mezi deformací a teplem, které vznikne v materiálu při procesu tváření. Pro zjištění této závislosti byly měřeny termogramy ze statické zkoušky tahem, tribologické zkoušky a jednoduchého rotačního výtažku. Výsledkem experimentálního měření je porovnání teplotních polí naměřených za různých rychlostí posuvů a v případě měření kelímku za různých přidržovacích tlaků.

### Abstract:

The aim of this thesis is to describe relation between deformation and warm which originates in material during stamping process. For detection of this relation was measured thermograms from static tensile test, tribological testing and simple rotary stamping. Result of the experimental measuring is comparison fields of temperature measured under different feed speeds and in the case of cup measuring under different holding pressures.



### **Místopřísežné prohlášení**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vykonal samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2007

.....

Jan Wimmer  
Jáchymovská 267/32  
460 10 Liberec

## **Poděkování**

Na začátku své diplomové práce bych rád touto cestou poděkovat všem pracovníkům z Oddělení tváření kovů a plastů Katedry strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci, zejména pak vedoucímu této diplomové práce Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. a odbornému konzultantovi Ing. Jiřímu Sobotkovi za poskytnutí odborných rad a pomoc s vypracováním této diplomové práce.

## **Obsah**

1 Úvod .....	10
2 Zjišťování stavu napjatosti a stupně deformace na výtažcích .....	11
2.1 Deformační síť .....	11
2.2 Stupeň deformace a stavy napjatosti .....	11
2.3 Numerická simulace plošného tváření .....	13
2.3.1 Vývoj a příprava výroby výlisku užitím numerické simulace .....	15
2.3.2 Potřebná data výpočtového modelu .....	15
2.3.3 AutoForm .....	16
2.3.4 PAM-Stamp 2G .....	16
2.3.4.1 Příprava souboru s geometrií CATIA pro PAM-Stamp 2G .....	17
3 Základy měření teploty, tepla a infraradiace .....	17
3.1 Přenos tepla vedením .....	18
3.2 Přenos tepla prouděním .....	19
3.3 Přenos tepla zářením .....	20
3.3.1 Vliv teploty tělesa .....	21
3.3.2 Vliv Barvy povrchu .....	22
3.3.3 Určování emisivity .....	23
3.3.4 Měření teploty u kovů .....	25
3.3.5 Přenos tepla zářením v praxi .....	26
4 Podstata termografie .....	28
4.1 Termokamera Fluke Ti55/20 FT .....	28
4.2 Termokamera Flir P65 Pal .....	29
5 Teorie tváření kovů .....	30
5.1 Fyzikální podstata teorie tváření kovů .....	30
5.2 Poruchy v krystalové mřížce kovů .....	32
5.3 Deformace a jejich vznik .....	34
5.3.1 Deformace monokrystalů .....	34
5.3.2 Deformace polykrystalů .....	35
5.3.3 Deformační zpevnění .....	36
5.4 Mechanika tvářecích pochodů .....	37
5.4.1 Stav napjatosti .....	37
5.4.2 Schémata hlavních deformací .....	40

5.4.3 Podmínky vzniku plastické deformace .....	41
5.5 Tažení .....	43
5.5.1 Tažení jednoduchých výtažků z kruhového přístříhu .....	43
6 Pozinkované plechy .....	46
6.1 Žárový pozink .....	47
6.2 Elektrolytický pozink .....	48
7 Experimentální část .....	49
7.1 Cíl experimentální části .....	49
7.2 Zjištění materiálových dat vzorku .....	50
7.3 Obecné podmínky při měření termokamerou Flir P65 Pal .....	53
7.4 Měření tahové zkoušky termokamerou Flir P65 Pal .....	54
7.4.1 Rychlost posuvu 10mm/min .....	55
7.4.2 Rychlost posuvu 50mm/min .....	56
7.4.3 Rychlost posuvu 100mm/min .....	57
7.4.4 Rychlost posuvu 600mm/min .....	58
7.4.5 Rychlost posuvu 50mm/s .....	59
7.4.6 Rychlost posuvu 100mm/s .....	60
7.4.7 Rychlost posuvu 200mm/s .....	61
7.4.8 Rychlost posuvu 400mm/s .....	62
7.5 Měření tribologie Termokamerou Flir P65 Pal na zařízení Sokol 400 .....	63
7.5.1 Rychlost posuvu 1mm/s na dráze 100mm .....	64
7.5.2 Rychlost posuvu 10mm/s na dráze 100mm .....	67
7.5.3 Rychlost posuvu 50mm/s na dráze 100mm .....	69
7.5.4 Rychlost posuvu 100mm/s na dráze 200mm .....	70
7.5.5 Rychlost posuvu 200mm/s na dráze 300mm .....	72
7.5.6 Rychlost posuvu 400mm/s na dráze 300mm .....	73
7.5.7 Souhrnná závislost z tribologické zkoušky .....	75
7.6 Měření tahové zkoušky termokamerou Flir P65 Pal s olejovou vrstvou .....	75
7.7 Tažení válcové nádoby měřené termokamerou Flir P65 Pal .....	78
7.8 Simulace v prostředí PAM-Stampu .....	81
8 Diskuse naměřených výsledků .....	83
9 Závěr .....	85
Použitá literatura .....	86
Seznam Příloh .....	88

## Seznam použitých symbolů

<u>Označení</u>	<u>Název</u>	<u>Jednotka</u>
a	Délka	[m]
$A_x$	Tažnost	[%]
b	Wienova konstanta	[m·K]
$b_x$	Šířka	[m]
c	Koeficient monotónního zpevnění	[Pa]
$c_s$	Rychlost světla	[m·s <sup>-1</sup> ]
$c_x$	Hloubka	[m]
D	Vnější průměr	[m]
d	Vnitřní průměr	[m]
E	Yongův modul pružnosti	[Pa]
$E_p$	Potenciální energie	[J]
F	Síla	[N]
h	Výška	[m]
$h_k$	Koeficient přenosu tepla prouděním	[W·K·m <sup>-2</sup> ]
$h_p$	Planckova konstanta	[J·s]
k	Boltzmannova konstanta	[J·K <sup>-1</sup> ]
l	Délka	[m]
$L_x$	Délkový rozměr	[m]
$m_\sigma$	Ukazatel stavu napjatosti	[-]
n	Exponent deformačního zpevnění	[-]
p	tlak	[Pa]
P	Tepelný výkon	[W]
r	Anizotropie	[-]
R	Smluvní napětí	[Pa]
$r_p$	Poloměr zaoblení	[m]
s	Rychlost posuvu	[m·s <sup>-1</sup> ]
S	Plocha	[m <sup>2</sup> ]
T	Teplota	[°C]
t	čas	[s]
$t_d$	Tloušťka desky	[m]
$T_t$	Termodynamická teplota	[K]
W	Celková intenzita záření	[W·m <sup>-2</sup> ]

<b><u>Označení</u></b>	<b><u>Název</u></b>	<b><u>Jednotka</u></b>
$W_\lambda$	Plošná hustota spektrálního vyzařování	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
$W_x$	Exicitance	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
$\lambda$	Vlnová délka	$[\text{m}]$
$\lambda_k$	Míra plastické poddajnosti získaná z tahové zkoušky	$[-]$
$\lambda_v$	Tepelná vodivost	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$\varepsilon$	Emisivita v jednotkách pro černé těleso	$[-]$
$\varepsilon_x$	Poměrná deformace	$[-]$
$\mu$	Poissonovo číslo	$[-]$
$\rho$	Hustota dislokací	$[\text{m}^{-2}]$
$\sigma$	Normálové napětí	$[\text{Pa}]$
$\sigma_b$	Stefan-Boltzmannova konstanta	$[\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$
$\tau$	Smykové napětí	$[\text{Pa}]$
$\varphi$	Skutečná deformace	$[-]$

## 1 Úvod

Oblast tváření je jednou z nejvýznamnějších technologií, která je hlavně díky svému širokému uplatnění nepostradatelnou součástí strojírenské výroby. Vlastním tvářením dochází ke změně tvaru a vlastností výchozího materiálu, a to působením vnějších sil, které způsobují plastické přetvoření a trvalou deformaci materiálu.

Obor tváření kovů je díky novým možnostem využití moderních materiálů velice dynamickým a jakékoliv nové poznatky v této oblasti, které zefektivňují výrobu, jsou rychle implementovány do praxe. V dnešní době se s uplatněním především plošného tváření lze setkat v řadě oborů. Nejvýznamnějším z nich je jistě automobilový průmysl. Konkurence v tomto oboru je obrovská, výrobní závody světových automobilek opouští denně tisíce nových automobilů. Ve snaze uspět na trhu se výrobci automobilů snaží zaujmout zejména cenou a vzhledem. To samotné ovlivňuje použité materiály a stupeň jejich přetvoření tím způsobem, že se při procesu tváření snažíme v co největší míře využít jejich mechanických vlastností. Z výše popsaných důvodů je proto často nutno na výliscích analyzovat stav napjatosti a rozložení deformace. Současné metody měření těchto parametrů jsou ale značně časově náročné, a pro velkosériovou výrobu se příliš nehodí. Proto se hledají nové a rychlejší metody analýzy tvářecích procesů. Z tohoto podnětu vznikla i tato diplomová práce, která se zabývá vztahem mezi naměřenou teplotou na výtažku a jeho deformací. Předpokládá se navrhnout takovou metodiku měření deformace výlisku, kdy by se vycházelo z termogramu výlisku zhotoveného ihned po tvářecí operaci. Z rozložení teplot na výlisku by měly být patrné kritické oblasti výlisku. Porovnáváním termogramů by pak bylo možné sledovat zda a jakým způsobem se mění kritické oblasti v závislosti na změně vstupujících technologických parametrů.

## 2 Zjišťování stavu napjatosti a stupně deformace na výtažcích

[1-7] Při zjišťování napětí a deformace u tvářeného tělesa má na výsledek analýzy rozhodující vliv správná volba metody řešení tohoto problému. Existují dvě základní metody jak zjišťovat napjatost a stupeň deformace na výtažku, a to praktická a teoretická. Praktická je nejčastěji založena na metodě deformačních sítí, zatímco teoretická se provádí s přispěním diferenciálních rovnic rovnováhy s použitím podmínek plasticity. Z důvodu značné složitosti celého procesu tváření se však teoretický výpočet často výrazně liší od skutečnosti.

### 2.1 Deformační síť

Tato metoda se úspěšně uplatňuje pro technologii plošného tváření. Princip této metody spočívá v tom, že se na plech před operací lisování nanese deformační síť a po lisování vyhodnotíme její přetvoření. To umožní studium rozložení deformací a analýzu napjatosti v jednotlivých místech výtažku. K tvorbě této deformační sítě se především používají elementy kruhového tvaru a to hlavně proto, že při tvorbě těchto sítí není nutné znát směry hlavních napětí. Ty totiž určují směry hlavních os vzniklých elips, ve které se výchozí kruhové elementy přetvoří. To však platí pouze za předpokladu, že směry hlavních napětí zůstávají v průběhu tváření nezměněny.

Způsobů jak nanášet deformační síť na plech je celá řada, např. elektrolytickým leptáním, potiskováním, vyjiskřováním, nanášení fotografickou cestou, laserem atd. Nejrozšířenější z nich je elektrolytické leptání, ostatní metody se používají jen okrajově. Ke spolehlivé možnosti analýzy přetvoření výtažku je nutné, aby zvolená technologie zaručovala, že se vzniklá deformační síť v průběhu tváření nenaruší.

### 2.2 Stupeň deformace a stavy napjatosti

Na Obr. 2.2.1 je znázorněna elementární ploška na povrchu výlisku, na niž působí hlavní normálová napětí pro která platí:

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : 0 : m_\sigma. \quad (2.2.1)$$

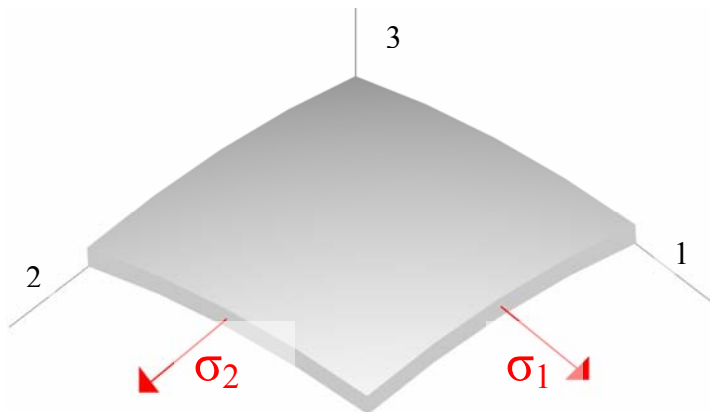
Z toho vyplývá, že napětí působící ve směru tloušťky plechu  $\sigma_3$ , se předpokládá rovno nule. Pak dostaneme vztah



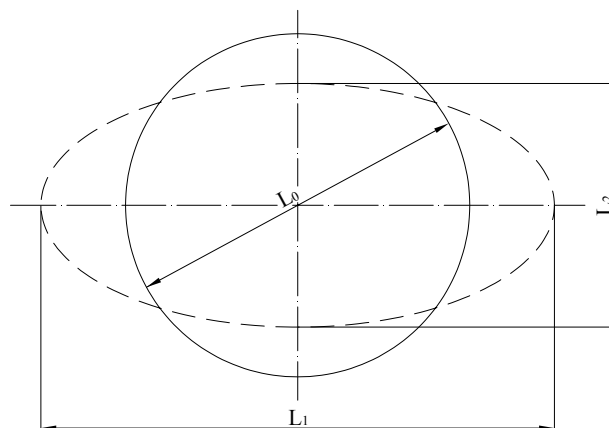
$$m_{\sigma} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad (2.2.2)$$

kde:

$m_{\sigma}$  .... Ukazatel stavu napjatosti [-].



Obr. 2.2.1 Elementární plocha výtažku



Obr. 2.2.2 Změna kruhového elementu v elipsu

Jak je patrné z obrázku (Obr. 2.2.2) a jak jsme si již dříve uvedli, elementy kruhového tvaru se vlivem deformace mění na elipsy. Z těchto rozměrů lze vypočítat skutečnou deformaci, která je dána následujícími vztahy:

$$\varphi_1 = \ln \frac{L_1}{L_0}, \quad (2.2.3)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{L_2}{L_0}. \quad (2.2.4)$$

Napětí která způsobují přetvoření, působí sice pouze v rovině plechu ( $\sigma_3=0$ ), ale k deformaci plechu dochází i ve směru jeho tloušťky. Stupeň deformace v tomto směru ( $\varphi_3$ ) vyjádříme ze zákona zachování objemu:

$$\begin{aligned}\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 &= 0 \\ \varphi_3 &= -\varphi_1 - \varphi_2\end{aligned}\quad (2.2.5)$$

Stupeň deformace v daném místě výtažku je tedy vyjádřen pomocí hodnoty deformace v každém směru ( $\varphi_1, \varphi_2$  a  $\varphi_3$ ). Míra přetvoření tvářeného tělesa v daném místě je vyjadřována pomocí intenzity deformace  $\varphi_i$ , která se dá s pomocí  $m_\sigma$  vyjádřit vztahem:

$$\varphi_i = \lambda_k \cdot \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2}, \quad (2.2.6)$$

kde:

$\varphi_i$  ..... Intenzita deformace [-],

$\lambda_k$  ..... Míra plastické poddajnosti získaná z tahové zkoušky [-].

Stav napjatosti je možno za určitých předpokladů vyjádřit následujícím způsobem:

$$m_\sigma = \frac{2 \cdot \varphi_2 + \varphi_1}{2 \cdot \varphi_1 + \varphi_2}. \quad (2.2.7)$$

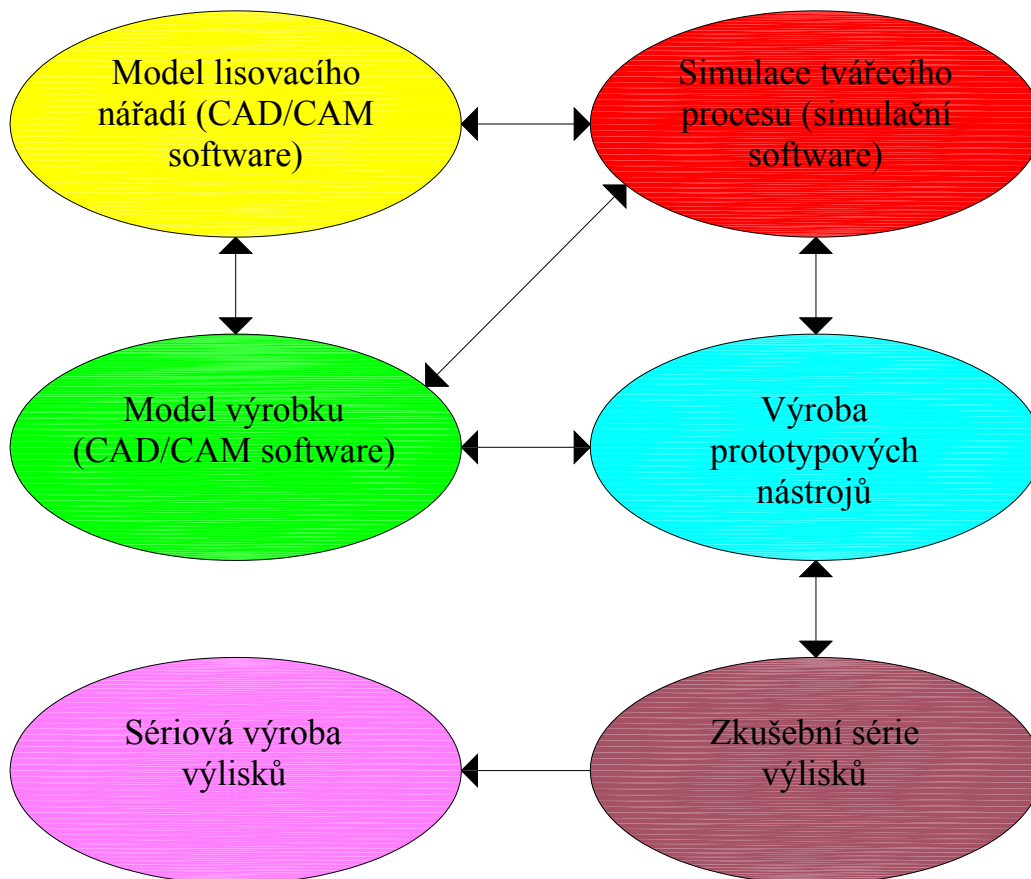
S použitím této metody je tedy možno poměrně snadno stanovit stupeň deformace a stav napjatosti v libovolném bodě výlisku tím, že určíme hlavní přetvoření  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ . Nyní budou uvedeny předpoklady, za kterých je možno těchto vztahů použít:

- předpoklad izotropního materiálu (bez směrově rozdílných mechanických vlastností),
- musí platit  $m_\sigma = \text{konst.}$  pro sledovaný element během tváření,
- směry hlavních deformací  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  musí být označeny tak, aby platilo  $-1 \leq m_\sigma \leq 1$ .

## 2.3 Numerická simulace plošného tváření

Obrovský rozmach počítačové technologie v posledním desetiletí přinesl výrazné změny i v procesu vývoje náradí a výlisků. Postup je následovný: ve virtuálním prostředí je nejprve vymodelován tvar výlisku. To probíhá v některém CAD/CAM/CAE softwaru (např. Catia, Pro/ENGINEER). K němu jsou posléze vytvořeny lisovací nástroje a výpočtové simulace procesů tažení a lisování, to zase obstará simulační software (např. PAM-Stamp, Auto Form), kde je simulován samotný proces tváření. Tato metoda je velmi vhodná při přípravě sériové výroby,

a to zejména tvarově složitých a velkoplošných výlisků. Postupem doby virtuální tvorba prototypových nástrojů a výlisků absolutně ovládla procesy vývoje a výroby v lisovnách.

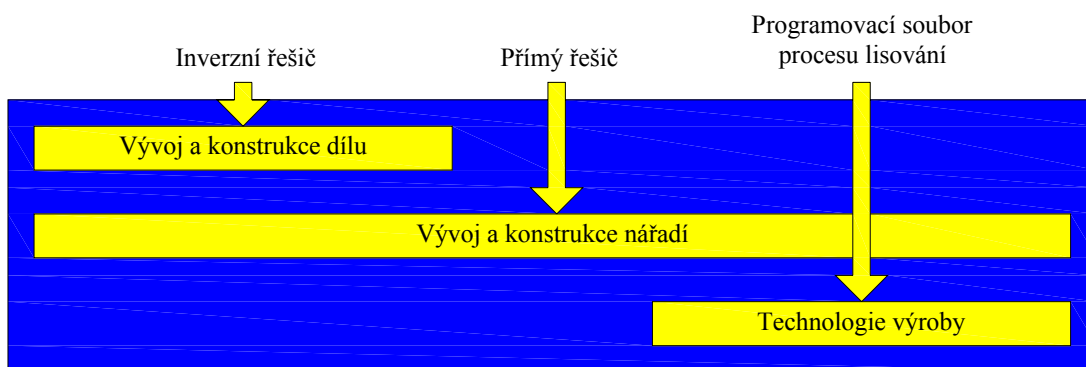


Obr. 2.3.1 Schéma procesů vývoje a výroby výlisků

Při numerické simulaci se uplatňuje metoda konečných prvků (MKP), ve které se nástroje a výlisek nahrazují trojúhelníkovými skořepinovými prvky. Napětí a deformace ve výlisku se získá užitím časově integrační rovnice rovnováhy sil. Výsledek simulace závisí na zvoleném chování modelu materiálu a na jeho vnějším zatěžování. Přesnost numerické simulace plošného tváření je ovlivněna několika faktory, jako je pružně-plastické chování materiálového modelu, stupeň věrohodnosti geometrického tvaru a metoda samotného výpočtu. Tyto parametry nadále ovlivňují i časovou, respektive hardwarovou náročnost výpočtu.

### 2.3.1 Vývoj a příprava výroby výlisku užitím numerické simulace

Nespornou a zásadní výhodou použití výpočetní techniky a programů schopných popsat procesy při plošném tváření je rychlost, přesnost a vysoká úspora nákladů. Ta spočívá v tom, že se vhodnost navržených podmínek pro tváření optimalizuje přímo na obrazovce počítače. Tím také získáme rychlou a přesnou zpětnou vazbu, která je při správném návrhu nástroje tak důležitá. Optimalizace se především týká rádiusů a tvarů technologických ploch na výlisku, neboť tyto parametry značnou měrou ovlivňují vytažitelnost výlisku. Ve vývoji a přípravě výroby výlisku užitím numerické simulace rozlišujeme tři časové úseky:



Obr. 2.3.1.1 Členění a užití simulačních programových souborů v etapách vývoje a přípravy výroby

Inverzní řešič dokáže provést deformačně napěťovou analýzu výlisku v momentě, kdy známe výsledný tvar výlisku. Z výsledků simulace nás zajímá především ztenčení, výskyt neprotvářených oblastí, kvalita výsledného povrchu a místa s nebezpečím tvorby přeložek a trhlin ve výlisku. Z těchto výsledků můžeme zpětně optimalizovat polohu a činnost brzdících lišt, výchozí tvar a materiál přístřihu, odpružení výlisku po odstřižení a kalibraci tvaru.

### 2.3.2 Potřebná data výpočtového modelu

Jedná se o seznam dat a informací, které uživatel potřebuje k simulaci procesu lisování:

- soubor s geometrií CAD nástroje,

- soubor s geometrií přístřihu (u jednoduchých tvarů je možné jej vytvořit v pre-processingu),
- orientace nástrojů vůči směru lisování,
- kinematika lisovacího procesu (pohyb a vzájemná pozice při lisování),
- součinitel tření mezi nástroji a přístřihem,
- materiálové charakteristiky přístřihu plechu,
- atd.

### 2.3.3 AutoForm

Moduly AutoForm Incremental a AutoForm Trim poskytují vysoce přesné a rychlé řešení problematiky hlubokého tažení plechu a umožňují provést kompletní simulaci všech jevů vznikajících při hlubokém tažení plechů, jako je gravitace, přidržení, tažení (a to i více krokové), odstřížení, kalibrace, odpružení nebo optimalizace střížné kontury. AutoForm k řešení využívá jak membránového prvku, tak skořepinového elementu, a tím umožňuje uživateli volbu rychlosti nebo přesnosti podle potřeby nebo stavu projektu, a tím přispívá k rychlému průběhu vývoje výlisku a procesu lisování.

### 2.3.4 PAM-Stamp 2G

Software pro komplexní řešení plošného tváření plechů, od konstrukce nástroje, přes ověření lisovatelnosti, až po naladění procesu tváření s ověřením nástroje. PAM-Stamp disponuje výkonným řešičem výpočtové analýzy se skořepinovým modelem plechového nástřihu, přátelským uživatelským prostředím, intuitivním ovládáním a vysokým stupněm funkcionality. Při výpočtové simulaci je výchozím bodem CAD model povrchu jednoho z nástrojů, který se v první fázi přípravy dat převede pomocí jednoho z automatických generátorů na síť přístřihu plechu. To se děje za uživatelské specifikace okrajových, kontaktních a zatěžujících podmínek. Vlastní řešení plně uvažuje s nelineární deformační historií přístřihu plechu, v důsledku které umožňuje PAM-Stamp zahrnout do výpočtu kritéria, jako lokální překročení mezní hodnoty plastické deformace, porušení soudružnosti materiálu plechu v průběhu tažení, dosažení křivky mezních deformací a ztenčení plechu.

### 2.3.4.1 Příprava souboru s geometrií CATIA pro PAM-Stamp 2G

Prostředí PAM-Stampu 2G používá pro přenos geometrie nástroje data ve formátu \*.igs, \*.vda nebo \*.uni. A právě CATIA je jedním z velice vhodných programů pro tvorbu geometrie nástroje. Jedná se o nejrozšířenější program pro 3D počítačové konstruování v oblasti CAD/CAM/CAE systémů pro automobilový průmysl. CATIA se také řadí do skupiny označovaných jako cord systém, což znamená, že je schopna obsáhnout návrhářskou práci od tvorby designu, vlastní konstrukce, přes různé analýzy, simulace a optimalizace až po tvorbu dokumentace a NC programů pro vlastní výrobu. Velkou výhodou celého systému je jeho provázanost. Ta spočívá v tom, že při změnách výkresu se okamžitě mění i výsledný NC program, takže je možná snadná a rychlá modifikace v jakékoliv fázi vývoje výrobku. Síla tohoto programu, ve srovnání s jeho konkurencí, je především v konstrukci komplexních ploch, ale je třeba dodat, že díky výkonným nástrojům, je v současnosti už na špici i co se týká tvorby solidů. Možná kombinace tvorby komplexních ploch a solidů dohromady, nebo výběr výhodnější a rychlejší varianty tvorby modelu, dělá právě tento program tak efektivním. Jedná se o hybridní modelář, takže podporuje parametrické modelování, ale má v sobě i velmi šikovný nástroj pozdější parametrizace, který umožňuje provést parametrizaci ve chvíli, kdy to potřebujeme, což značně urychluje a usnadňuje počáteční tvůrčí práci při návrhu výrobku.

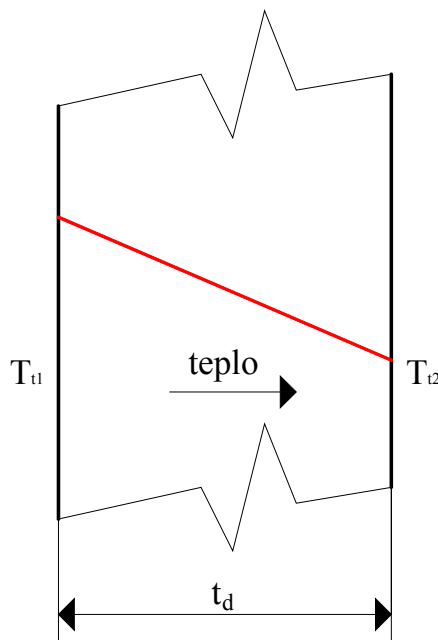
## 3 Základy měření teploty, tepla a infraradiace

[8-13] Teplota je mírou termální energie obsažené v jakémkoli objektu. Teplota kteréhokoliv objektu se dá změřit množstvím metod a prostředků a je definována teplotní stupnicí. Teplota nám ve své podstatě říká, kterým směrem poteče tepelný tok mezi dvěma objekty.

Existují tři základní typy přenosů tepla: vedení (kondukce), proudění (konvekce) a záření (radiace). Všechno teplo je přenášeno jedním z těchto tří typů přenosů, obvykle ale kombinací dvou nebo všech tří typů přenosů. Infračervená termografie je pochopitelně nejbližší radiačnímu přenosu tepla, ale důležité je pochopit všechny tři typy, abychom mohli lépe chápat význam infračervených termogramů.

### 3.1 Přenos tepla vedením

Tento typ přenosu tepla se uplatňuje hlavně u pevných těles, ale také u kapalin a plynů. Jde vlastně o přenos vibrací (kmitání) atomů pevných těles, nebo srážky molekul plynů, čímž dochází k pohybu energie od teplejší molekuly směrem ke studenější.



Obr. 3.1.1 Přenos tepla vedením

Fourierův zákon toku tepla vedením má následující matematické vyjádření,

$$\frac{P}{S} = \lambda_v \cdot \frac{T_{t1} - T_{t2}}{t_d}, \quad (3.1.1)$$

kde :

P ..... Tepelný výkon [W],

S ..... Plocha desky [m<sup>2</sup>],

t<sub>d</sub> ..... Tloušťka desky [m],

T<sub>t1</sub> .... Termodynamická teplota na začátku [K],

T<sub>t2</sub> .... Termodynamická teplota na konci [K],

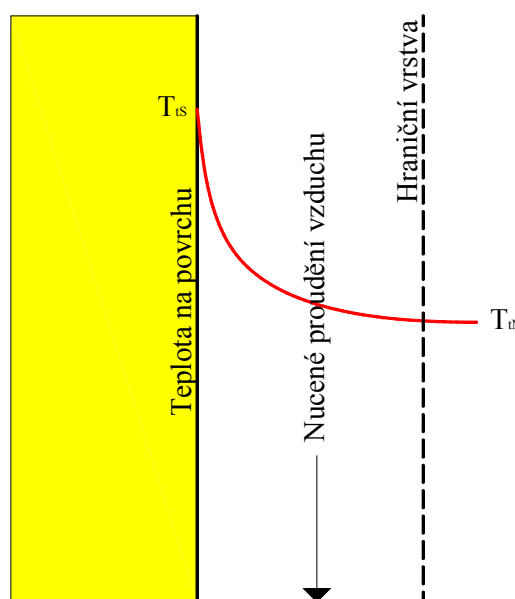
λ<sub>v</sub> ..... Tepelná vodivost [W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>].

Tento vztah má za následek to, že rychlost přenosu tepla roste se zvyšujícím se rozdílem teplot a zvětšováním tepelné vodivosti, a naopak klesá s rostoucí

tloušťkou desky. Všeobecně je tepelná vodivost u kovů vyšší než u nekovových a porézních materiálů.

### 3.2 Přenos tepla prouděním

Tento typ přenosu tepla se uplatňuje u pohybujících se skupenství. Také je skoro vždy u přenosu tepla mezi pevným a kapalným (plynným) skupenstvím. Přenos tepla prouděním rozdělujeme na volné a nucené proudění. Volné proudění se uplatňuje, když přenos tepla způsobuje změnu hustoty kapaliny, a teplejší část stoupá vzhůru, jako výsledek vzrůstajícího vztlaku. Nucené proudění se uplatňuje i tehdy, když vnější zdroj, jako např. ventilátor chlazení, uvádí kapalinu (plyn) do pohybu. Jako názorný příklad si můžeme uvést tepelné proudění vzduchu na povrchu výměníku tepla, který je hnán ventilátorem směrem k výměníku. Tepelná energie na povrchu výměníku se přenáší do vzduchu, a dochází tak k ochlazování povrchu výměníku a oteplování vzduchu.



Obr. 3.2.1 Přenos tepla prouděním

Na obrázku (Obr. 3.2.1) máme schéma, které nám popisuje situaci přenosu tepla z pevné desky na pohybující se kapalinu (plyn). U přenosu tepla prouděním se přenos tepla děje dvojím způsobem, a to přímým vedením tepla kapalinou (plynem), nebo pohybem vlastní kapaliny (plynu). Newtonovo pravidlo pro chlazení nám definuje koeficient přenosu tepla prouděním, který kombinuje oba dva mechanismy:



$$h_k = \frac{P}{S \cdot (T_{ts} - T_{tN})}, \quad (3.2.1)$$

kde:

P ..... Tepelný výkon [W],

S ..... Plocha [m<sup>2</sup>],

T<sub>ts</sub> .... Termodynamická teplota povrchu stěny[K],

T<sub>tN</sub> .... Termodynamická teplota kapaliny (plynu)[K],

h<sub>k</sub> ..... Koeficient přenosu tepla prouděním [W·K·m<sup>-2</sup>].

Přítomnost desky způsobuje volnou rychlost kapaliny, která klesá u povrchu desky na nulu a směrem od desky se mění až k hraniční vrstvě. Tloušťka hraniční vrstvy závisí na volné rychlosti kapaliny a je větší pro volné proudění a menší pro proudění nucené. Rychlost proudění tepla závisí na tloušťce hraniční vrstvy a tepelném rozdílu T<sub>S</sub> a T<sub>N</sub>. Přenos tepla prouděním na jednotku plochy si můžeme vyjádřit upraveným Newtonovým vztahem:

$$\frac{P}{S} = h_k \cdot (T_{ts} - T_{tN}). \quad (3.2.2)$$

Tento vzorec nám říká, že rychlost tepelného toku roste s rostoucím rozdílem teplot a s rostoucím koeficientem přenosu tepla a také, že vzrůstající rychlost kapaliny (plynu) má za následek rostoucí koeficient přenosu.

### 3.3 Přenos tepla zářením

Přenos tepla zářením se od předcházejících dvou přenosů liší v několika parametrech:

- může procházet vakuem,
- uskutečňuje se elektromagnetickou emisí a absorpcí,
- probíhá rychlostí světla a chová se jako světlo,
- zatímco přenos tepla vedením a prouděním mezi dvěma body je lineárně závislé na rozdílu teplot mezi těmito dvěma body, pak energie vyzařovaná z povrchu je úměrná čtvrté mocnině své absolutní teploty. Tepelná radiační energie přenášená mezi dvěma povrchy je úměrná třetí mocnině tepelného rozdílu mezi oběma povrchy.

Tento typ přenosu tepla je založen na fyzikálním procesu, při kterém látka emituje do prostoru energii, přičemž platí, že vyzařovaná energie je přímo úměrná ploše povrchu vyzařujícího tělesa. Další dva faktory ovlivňující velikost této vyzařované energie jsou popsány v následujících kapitolách.

### 3.3.1 Vliv teploty tělesa

Množství vyzářené energie je popsáno Plackovým vyzařovacím zákonem pro polarizované záření:

$$W_{\lambda} = \frac{\varepsilon \cdot c_s^2 \cdot h_p \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{c \cdot h}{k \cdot \lambda \cdot T_t}} - 1}, \quad (3.3.1.1)$$

kde:

$W_{\lambda}$  .... Plošná hustota spektrálního vyzařování [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],

$\varepsilon$  ..... Emisivita v jednotkách pro černé těleso [-],

$T_t$  ..... Termodynamická teplota [K],

$\lambda$  ..... Vlnová délka [m],

$k$  ..... Boltzmannova konstanta [ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ],

$c_s$  ..... Rychlost světla [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$h_p$  ..... Planckova konstanta [ $\text{J} \cdot \text{s}$ ].

Poloha maxima závislosti, kterou popisuje Planckův zákon, je dána Wienovým posunovacím zákonem, který konstatuje, že v záření absolutně černého tělesa je maximální energie vyzařována na vlnové délce, která se s rostoucí termodynamickou teplotou snižuje. To znamená, že čím teplejší je těleso, tím vyzařuje na kratších vlnových délkách a vyšších frekvencích:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T_t}, \quad (3.3.1.2)$$

kde:

$\lambda_{\max}$  ... Vlnová délka s maximální hodnotou vyzařování [m],

$b$  ..... Wienova konstanta [ $\text{m} \cdot \text{K}$ ],

$T_t$  ..... Termodynamická teplota [K].

Celkovou vyzářenou energii za jednotku času z jednotkové plochy absolutně černého tělesa vyjadřuje Stefanův-Boltzmannův zákon, který popisuje celkovou

intenzitu záření absolutně černého tělesa. Tento zákon říká, že intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa:

$$W = \sigma_b \cdot \varepsilon \cdot T_t^4, \quad (3.3.1.3)$$

kde:

$W$  ..... Celková intenzita záření [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],

$\varepsilon$  ..... Emisivita v jednotkách pro černé těleso [-],

$\sigma_b$  ..... Stefan-Boltzmannova konstanta  $\sigma_b = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot c_s^2 \cdot h_p^3} [\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$ ,

$T_t$  ..... Termodynamická teplota [K],

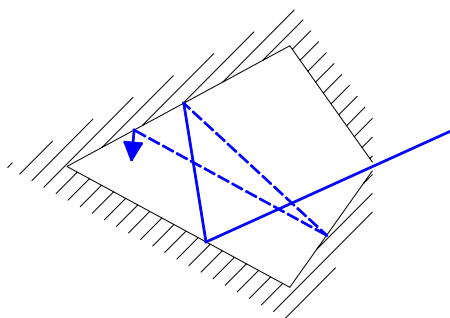
$k$  ..... Boltzmannova konstanta [ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ],

$c_s$  ..... Rychlost světla [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

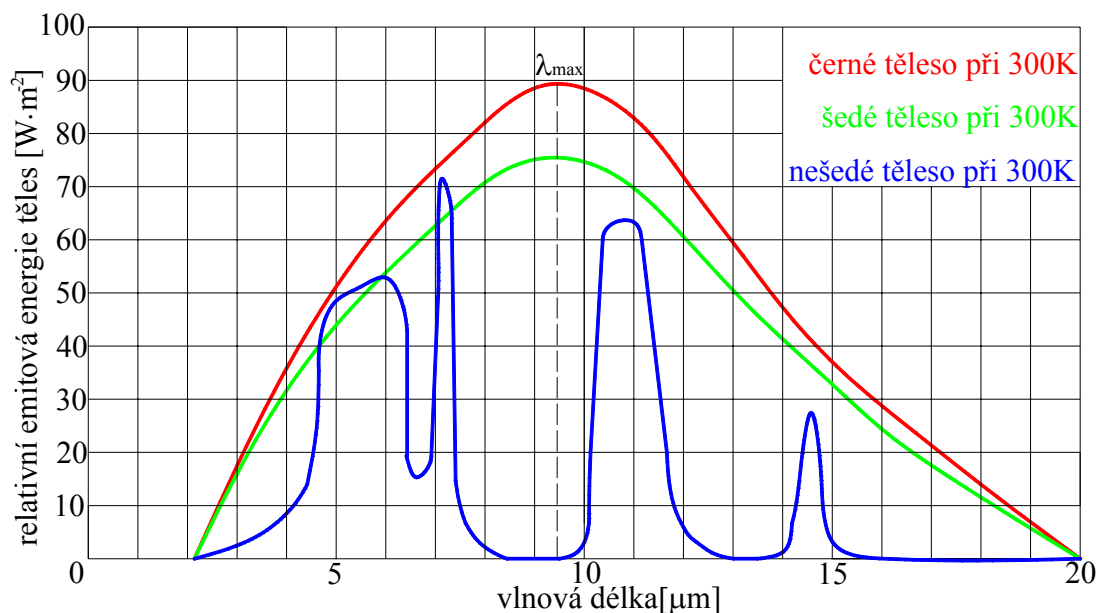
$h_p$  ..... Planckova konstanta [ $\text{J} \cdot \text{s}$ ].

### 3.3.2 Vliv Barvy povrchu

Nejmenší množství tepla je vyzařováno stříbřitě lesklými povrchy, největší černými. Toho se využívá například při konstrukci termosek, kde jsou povrchy stříbřitě lesklé pro minimalizaci předávání tepla sáláním. Jiným příkladem jsou naopak chladiče kosmických lodí, které jsou černé pro maximalizaci vysálaného tepla. Při teplotách nad 1300 K je ale pro většinu materiálů již rozdíl zanedbatelný, a s malou chybou lze počítat s tím, že se prakticky všechna tělesa chovají jako absolutně černé těleso. Z hlediska charakteristiky infračervené radiace rozlišujeme tři typy povrchů těles: černé těleso, šedé a naředlé (tzv. reálné nebo spektrální těleso). Černé těleso definujeme jako ideální těleso, které pohlcuje veškeré přicházející záření, které na něj dopadá, a jeho vyzařovací charakteristika je závislá na jeho povrchové teplotě. Emisivita reálného tělesa je definována jako poměr radiačních energií emitovaných z povrchu daného tělesa a tělesa černého při stejné teplotě. Ačkoliv černé těleso je pouze teorie a v praxi neexistuje, povrchy mnohých těles jsou šedé, což znamená že emisivita tělesa je téměř konstantní s vlnovou délkou.



Obr. 3.3.2.1 Teoretická představa dokonale černého tělesa



Obr. 3.3.2.2 Spektrální rozložení tří typů emitů při konstantní teplotě 300K

Pokud máme vyzařující černé těleso, pak má emisivitu rovnu jedné a neodráží ani jím neprochází žádná energie. Pokud máme vyzařující těleso šedé, pak se spektrální rozložení podobá rozložení tělesa černého, ale protože emisivita je menší než jedna, může také energii odrážet nebo propouštět. Pro emitující nešedé těleso také platí, že energie je odrážena a přenášena. Vzhledem k tomu, že souvislost mezi teplotou povrchu tělesa a vyzařovanou energií má pouze komponenta emitovaná excitance, začíná být jasné, že nejdůležitější krok který uděláme při infračerveném měření teploty, je eliminace nebo kompenzace zbylých dvou komponent.

### 3.3.3 Určování emisivity

Nejprve si je potřeba si shrnout fakta týkající se emisivity. Emisivita je mírou schopnosti daného předmětu vyzařovat infračervenou energii, která nese informaci o jeho teplotě. Emisivita může nabývat hodnot od 0 (lesklé zrcadlo) do 1 (dokonale

černé těleso). Většina organických, nabarvených nebo zoxidovaných povrchů má emisivitu blízkou hodnotě 0,95, proto mají některé jednodušší teploměry emisivitu pevně nastavenou na tuto hodnotu. Dokonalejší přístroje však již disponují možností uživatelského nastavení emisivity, aby ji bylo možno lépe přizpůsobit skutečným podmínkám měření. Jestliže je potřeba měřit lesklý předmět (zejména s teploměrem s pevně nastavenou emisivitou 0,95), musí se ošetřit jeho povrch dle možností matnou černou barvou, nebo vhodnou samolepicí páskou. Pak se měří teplota na tomto upraveném místě.

Pro stanovení emisivity měřeného objektu jsou různé metody. Zprvu lze vyhledat emisivitu používaných materiálů z tabulek. Tyto tabulky emisivity také pomáhají nalézt pásmo vlnových délek pro daný materiál, a tím zvolit správný měřicí přístroj. Zvláště v případě kovů by se hodnoty v těchto tabulkách měly používat pouze orientačně, protože povrchové podmínky (např. povrchy leštěné, zoxidované nebo zvrásněné) mohou velice výrazně emisivitu ovlivnit. Emisivitu konkrétního materiálu je možné určit různými metodami, vždy je ale nutné mít pyrometr (termokameru) s možností nastavení emisivity. Metody jak určit emisivitu měřeného materiálu jsou následovné:

1) Vzorek materiálu se ohřeje na známou teplotu, která se musí určit velmi přesným dotykovým teploměrem (např. termočlánekem). Potom se již měří teplota tohoto tělesa termokamerou a postupně se mění emisivita dokud naměřená teplota termokamery neodpovídá teplotě změřené dotykovým teploměrem. Tato emisivita se uplatní pro budoucí měření teploty předmětů z tohoto materiálu.

2) Při relativně nízké teplotě (do 260° C) se nalepí na měřený objekt speciální plastová samolepka se známou emisivitou. Infračerveným teploměrem se změří teplota samolepky s touto emisivitou. Potom se změří povrchová teplota měřeného objektu bez samolepky a přestaví se na teploměru emisivita tak, aby teploměr ukazoval správnou teplotu. Emisivita určená touto metodou se použije pro všechna měření na objektech z tohoto materiálu.

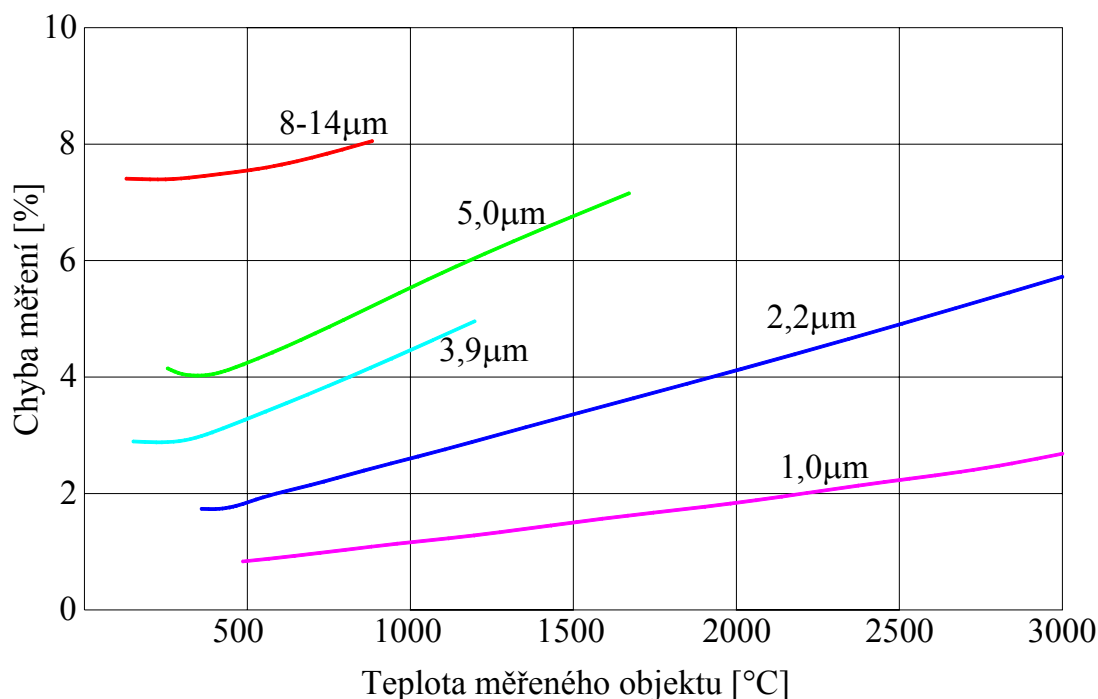
3) Zhotovením černého tělesa s použitím vzorku z materiálu, který je potřeba měřit. Do vzorku materiálu se vyvrtá otvor. Hloubka vyvrtané díry by měla být přinejmenším pětinasobkem jeho průměru. Průměr musí odpovídat velikosti plochy měřené tímto teploměrem. Jestliže emisivita vnitřních stěn je větší než 0,5, emisivita dutého tělesa je nyní kolem 1 a teplota měřená v otvoru je správná teplota měřeného objektu. Nyní se namíří infračervený teploměr na povrch měřeného objektu s tím, že

se postupně mění emisivita přístroje, dokud zobrazovaná teplota neodpovídá hodnotě předtím naměřené z černého tělesa. Emisivita určená touto metodou se použije pro všechna měření na stejném materiálu.

4) Podmínkou pro tuto metodu je, že měřený povrch lze natřít. Tento nátěr se provede matnou černou barvou, která má emisivitu kolem 0,95. Poté se již teplota materiálu měří v místě tohoto černého nátěru s emisivitou uvedenou výše.

### 3.3.4 Měření teploty u kovů

Emisivita kovů závisí na vlnové délce a teplotě. Protože kovy často odrážejí dopadající záření, mívají nízkou emisivitu, která může způsobovat chybné a nespolehlivé výsledky. V takovém případě je důležité zvolit přístroj, který měří infračervené záření při určité vlnové délce a v rozmezí určitého teplotního rozsahu, ve kterém kovy mají nejvyšší možnou emisivitu. U mnoha kovů chyba měření roste s vlnovou délkou, což znamená, že by se pro měření mělo použít co nejkratších vlnových délek.

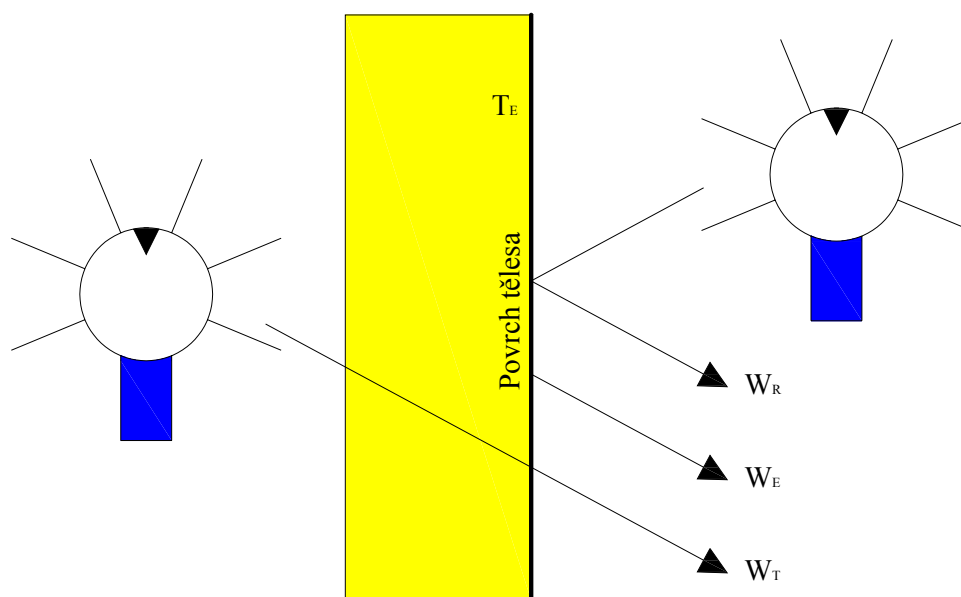


Obr. 3.3.4.1 Výsledná Chyba měření ovlivněná vlnovou délkou a teplotou měřeného objektu

Optimální vlnová délka pro vysoké teploty je u kovů kolem 0,8 až 1,0 μm na okraji viditelného rozsahu. Možné jsou také vlnové délky 1,6, 2,2 a 3,9 μm.

### 3.3.5 Přenos tepla zářením v praxi

Pro ilustraci přenosu tepla radiací uvedeme příklad montáže výkonového odporu vedle diody na desce obvodů. Množství tepelné energie vytvořené výkonovým odporem se vyzáří z povrchu odporu a určitá část je absorbována povrchem diody. Dioda se tímto ohřívá a odpor ochlazuje. Tepelná infračervená radiace opouštějící povrch tělesa se nazývá radiační excitance nebo radiosita. Ta může být emitována z povrchu, odražená od povrchu nebo může procházet povrchem, tak jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 3.3.5.1).



Obr. 3.3.5.1 Přenos tepla radiací

Celková excitance je rovna součtu jednotlivých komponent,

$$W_C = W_R + W_E + W_T, \quad (3.3.5.1)$$

kde:

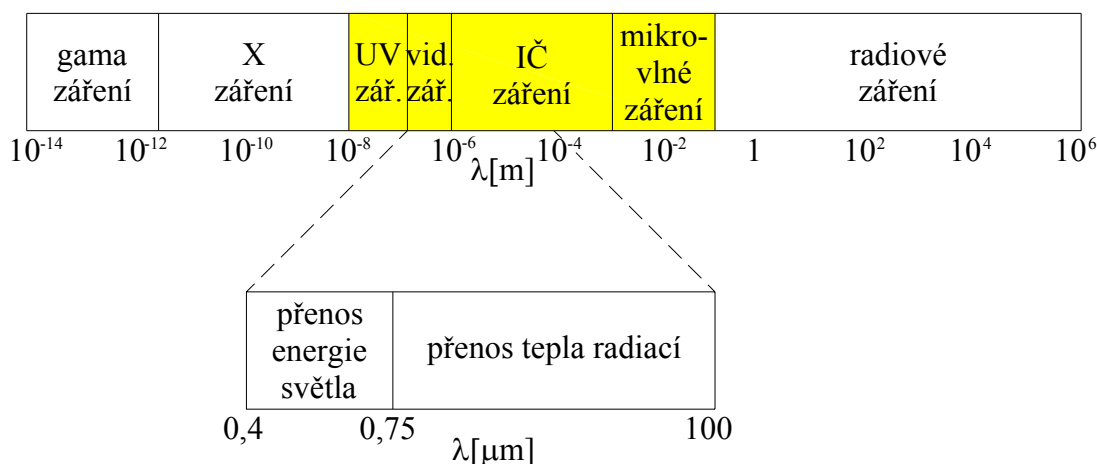
$W_C$  .... Celková excitance [ $W \cdot m^{-2}$ ],

$W_R$  .... Odražená excitance [ $W \cdot m^{-2}$ ],

$W_E$  .... Emitovaná excitance [ $m^2$ ],

$W_T$  .... Procházející excitance [ $m^2$ ].

Teplota povrchu je závislá pouze na jedné komponentě, a to na emitované excitanci. Měření tepelné infračervené radiace tvoří základ bezkontaktního měření teploty a infračervené termografie. Poloha oblasti infračerveného záření v oblasti celého elektromagnetického spektra je zobrazena na obrázku (Obr. 3.3.5.2).



Obr. 3.3.5.2 Světelná a infračervená část elektromagnetického spektra

Podobně jako světelná energie, je tepelná radiace záležitostí fotonů v elektromagnetickém spektru. Zatímco přenos energie světla se děje ve viditelné oblasti spektra od  $0,4 \mu\text{m}$  do  $0,75 \mu\text{m}$ , přenos tepla radiací zabírá oblast spektra mezi  $0,75 \mu\text{m}$  a asi  $100 \mu\text{m}$ , ačkoliv většina praktických měření se provádí v okolí  $20 \mu\text{m}$ .

Všechny povrchy těles, které vykazují vyšší teplotu než je absolutní nula, vysílají energii v infračerveném spektru a velmi teplá tělesa ve spektru viditelného světla. Pro ilustraci topná tělesa elektrických kamen s teplotou  $800 \text{ K}$  žhnou tmavě rudě, a jak postupně chladnou ztrácejí viditelnou červenou barvu, ale tepelná energie je stále vyzařovaná radiací – můžeme ji cítit rukama, pokud je dáte do blízkosti kamen, nicméně sálání už je neviditelné, protože došlo k posunu z červeného spektra do oblasti infračerveného spektra.

Infračervená radiace ze zkoumaného tělesa prochází na své cestě k infračervenému přístroji různými médii. Pokud je tímto médiem vakuum, pak neztrácí žádnou energii. V praxi ale u většiny měření je tímto médiem vzduch. Pro krátké vzdálenosti, např. několik metrů, lze vliv vzduchu zanedbat. Pokud tato vzdálenost naroste, pak je pochopitelně zdrojem chyb. Máme dva spektrální intervaly, které jsou relativně prosté ztrát z absorpce. Jde o tzv. atmosférická okna v pásmu  $3-5 \mu\text{m}$  a v pásmu  $8-14 \mu\text{m}$ . Většina přístrojů, pracujících v oblasti infračerveného spektra, pracuje proto v těchto oknech. Termokamera pracuje při snímání obrázků v okně  $8-14 \mu\text{m}$ .



## 4 Podstata termografie

[14-21] Termografie je bezkontaktní měření intenzity infračerveného záření na povrchu předmětů, a jejím výsledkem je termogram, což je digitální obraz teplotního pole, kde je příslušným teplotám přiřazena určitá barva. Čím je odstín tmavší, tím je povrchová teplota nižší a opačně.

Termografické kamery pracují na stejném principu jako klasické pyrometry. Tento princip využívá závislost vlnové délky vyzařovaného záření na teplotě. Čím je teplota vyšší, tím je vlnová délka vycházejícího záření kratší. V infrakameře se nachází snímací prvky CCD, které zachytí a zobrazí teplotní pole ve viditelné barevné škále. Termokamery však neměří přímo povrchovou teplotu, ale teplota je dopočítána na základě změřeného infračerveného záření a okrajových podmínek zadaných do kamery nebo do vyhodnocovacího programu. Mezi takové hodnoty patří emisivita povrchu, odražená teplota, vzdálenost mezi objektem a kamerou, relativní vlhkost a teplota vnějšího a vnitřního vzduchu. Hlavní důraz se klade na správné určení emisivity a odražené teploty (teplota všech okolních konstrukcí, které se mohou odrážet na povrchu měřené konstrukce). Vliv vzdálenosti mezi objektem a kamerou, relativní vlhkostí a teplotou vnějšího a vnitřního vzduchu, je při dobrých atmosférických podmínkách minimální.

Termokamery se používají tam, kde by vyhledávání teplejších nebo chladnějších míst bylo standardními pyrometry pracné nebo dokonce zcela nemožné. Typické jsou aplikace při diagnostice elektrických rozvaděčů, vyhledávání tepelných mostů, špatně izolovaných teplovodů, zkoumání teplotních polí forem, přehřívání mechanických dílů strojů a zařízení jako jsou ložiska, spojky, převodovky. Měření však nelze provádět při mlze, dešti nebo sněhu, protože voda je pro infračervené záření zcela nepropustná. Moderní technologická řešení umožňují konstruovat malé, lehké a levné ruční termokamery s jednoduchým ovládáním. Naměřená data se dají snadno ukládat, vyhodnocovat, editovat a archivovat v počítači.

### 4.1 Termokamera Fluke Ti55/20 FT

Termokamery Fluke Ti55/20 FT vynikají teplotní citlivostí v rozsahu  $-20^{\circ}\text{C}$  až  $+600^{\circ}\text{C}$  a vlastním rozlišením 320x240 teplotních bodů. Tyto vlastnosti je předurčují k náročným měřením malých tepelných rozdílů. Mají velký displej na kloubu a možnost volby ze tří objektivů s různými ohniskovými vzdálenostmi.

Vyznačují se jednoduchým intuitivním ovládáním a robustním provedením. Součástí základní dodávky je programové vybavení pro ukládání termogramů do počítače, jejich analýzu, editaci, tisk a přenos do dalších aplikací. Jak na kameře v terénu, tak posléze v softwaru na osobním počítači je možnost označit si jakýkoliv bod na snímku a tím zjistit ihned jeho teplotu. Tato řada dále umožňuje uživatelsky řízené prolínání obrazu ve viditelném spektru a termogramu ve spektru infračerveném. Přístroje jsou navíc vybaveny digitální kamerou a laserovým zaměřovačem pro lepší zachycení objektu.



Obr. 4.1.1 Termokamera Fluke Ti55/20 FT

## 4.2 Termokamera Flir P65 Pal

Profesionálními ručními termovizními kamerami jsou kamery ThermoCAM řady P, které disponují základní měřicí rozsah (-40 až 500°C, s filtrem až 2000°C) což umožňuje široké použití této řady. Díky většímu rozlišení (detektor o velikosti 320×240 bodů), citlivosti (0,08°C, nebo dokonce 0,05°C) a vestavěné videokameře, umožňující spolu s termogramy pořizovat také běžné obrazové záznamy, ukládat zvukové poznámky k jednotlivým termogramům a pořizovat vysokorychlostní záznam, jsou tyto přístroje výkonnými profesionálními nástroji pro přesné měření teplot a zobrazování teplotních polí. Dalšími jejich přednostmi jsou např. ovládání pouze jednou rukou a malá hmotnost přístroje (usnadňující práci při měření a zvyšující bezpečnost obsluhy), vestavěné menu v českém jazyce a termogramy ve

formátu JPEG, které jsou plně vyhodnotitelné (editovatelné) a libovolně přenositelné (bez nutnosti jakéhokoliv speciálního programu).



Obr. 4.2.1 Termokamera Flir P65 Pal

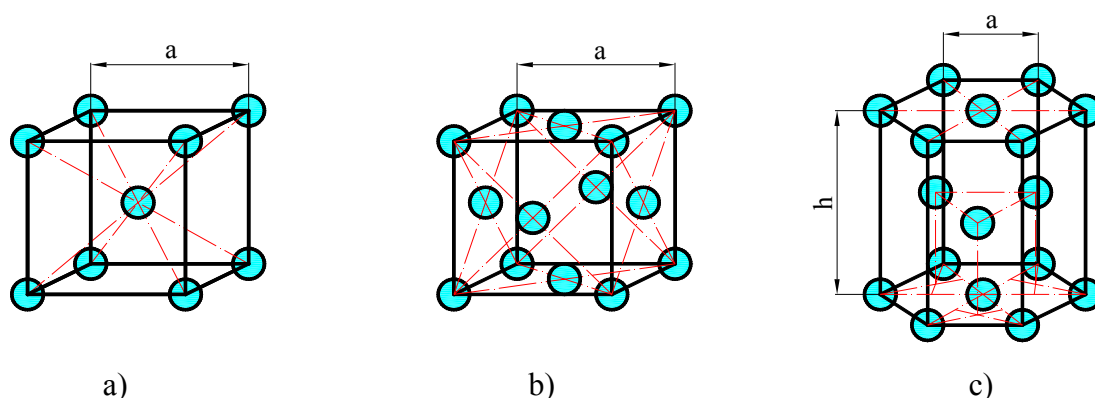
## 5 Teorie tváření kovů

[1,2,22-24] Tento samostatný obor řeší a realizuje technologii a metody tváření kovů včetně změn materiálu. Obsahuje veškeré poznatky z nauky o kovech, fyziky tuhé fáze, chemie, fyzikální chemie, nauky o pružnosti a pevnosti a plasticity. Za pomoci těchto znalostí jsme schopni určovat podmínky optimální tvárnosti kovů při různých technologických postupech s důrazem na co největší produktivitu a ekonomičnost tváření. Teorie tváření kovů se dále zabývá průběhem tváření, vznikem deformačních odporů během tváření, stanovením všech napětí potřebných k určení odporů a sil. Skládá se ze tří základních částí a to z fyzikální, fyzikálně chemické a mechanické.

### 5.1 Fyzikální podstata teorie tváření kovů

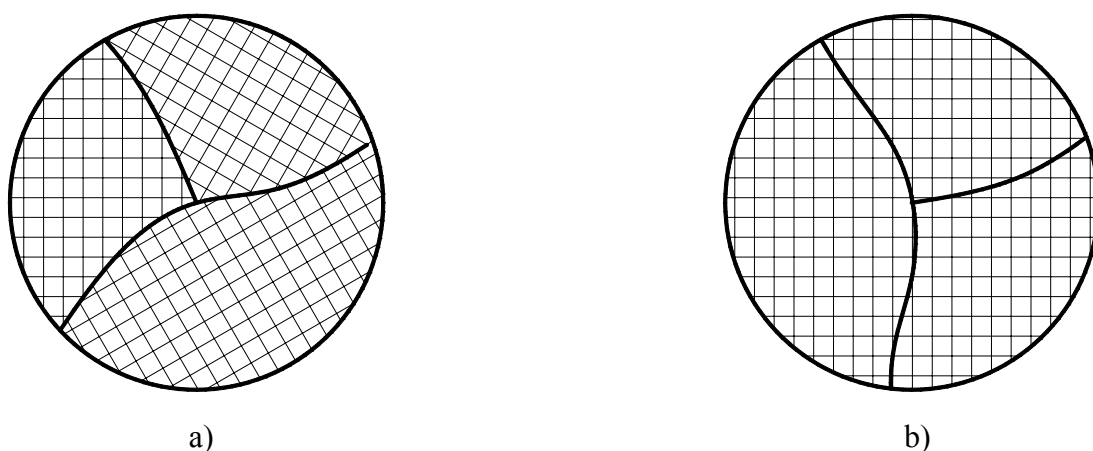
Kovy jsou látky krystalické, složené z rozličných atomů, které jsou v prostoru pravidelně uspořádány, a tvoří tak prostorovou krystalovou mřížku. Tato krystalová mřížka je dále tvořena ze základních krystalových buněk s vlastním a typickým uspořádáním pro každý kov, přičemž kovy nejčastěji krystalizují v soustavě krychlové a šesterečné. Krystalické látky můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin na monokrystaly a polykrystaly. O monokrystal se jedná v případě, kdy je uvažovaný

objem kovu tvořen pouze jedním krystalem, zatímco u polykrystalu je objem kovu tvořen z více krystalů. Technické kovy a jejich slitiny jsou látky polykrystalické.



Obr. 5.1.1 Hlavní typy krystalových buněk kovů: a) Krychlová, prostorově středěná  
b) Krychlová, plošně středěná c) Šesterečná s nejtěsnějším uspořádáním

Je tedy zřejmé, že každá z nich má své specifické roviny a směry, ve kterých má i svoje charakteristické fyzikální vlastnosti. Z tohoto hlediska je tedy anizotropní (fyzikální vlastnosti kovu závisí na směru, v kterém ho zatěžujeme), a jako taková se bude chovat i krystalová mřížka uvnitř jednotlivých zrn materiálu. Orientace mřížky však může být v jednotlivých zrnech různá, pak se kov chová jako izotropní (fyzikální vlastnosti kovu nezávisí na směru, v kterém ho zatěžujeme), a hovoříme o tzv. kvaziizotropii a polykrystalickém materiálu. Orientaci mřížky v jednotlivých zrnech lze ovlivnit volbou vhodné technologie, např. intenzivním tvářením za studena a žíháním lze docílit textury respektive anizotropie.



Obr. 5.1.2 Orientace mřížky v jednotlivých zrnech: a) Kvaziizotropní materiál  
b) Anizotropní materiál s výraznou texturou

## 5.2 Poruchy v krystalové mřížce kovů

Během krystalizace a při následném zpracování kovů vzniká v pravidelném uspořádání kovu řada poruch. Tyto poruchy mají velmi výrazný negativní vliv např. na mechanické vlastnosti kovu. Tyto poruchy ve stavbě krystalové mřížky lze rozdělit do následujících skupin:

**1) Bodové** – jejichž základní typy jsou:

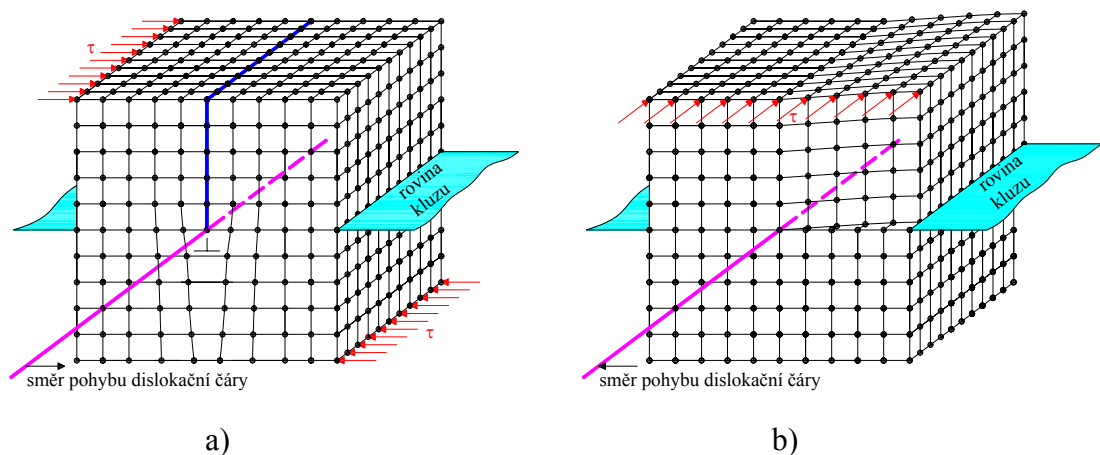
- vakance – neobsazená místa v mřížce,
- intersticie – cizí atom v mezimřížkové poloze,
- atom cizího prvku nahrazuje atom původní,

**2) Čárové** – říkáme jim dislokace,

**3) Plošné** – poruchy tvořené např. hranicemi zrn, vrstvenou chybou, nebo plochou dvojčatění,

**4) Prostorové** – poruchy jsou tvořeny cizími vměstkami, širokými hranicemi zrn, apod.

Nejdůležitější porucha pro vysvětlení plastické deformace se nazývá dislokace. Dislokace jsou čárové poruchy a podle jejich uspořádání je dále dělíme na dislokace hranové a dislokace šroubové.

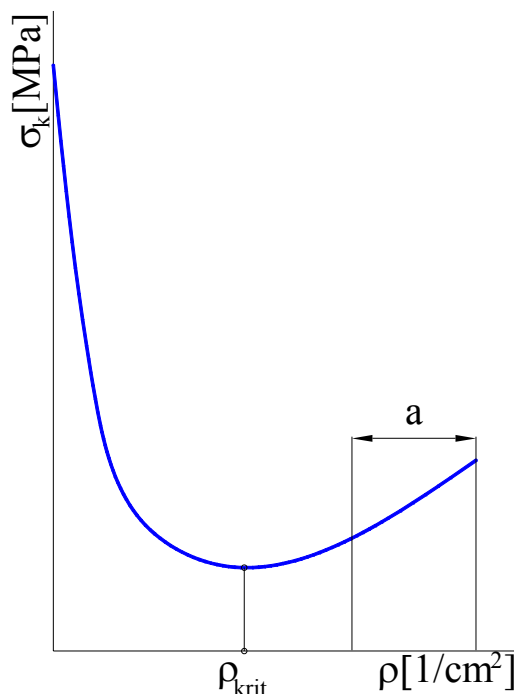


Obr. 5.2.1 a) Schematické znázornění hranové dislokace b) Schematické znázornění šroubové dislokace

Vznik hranové dislokace si lze vysvětlit představou, jakoby do dokonalé mřížky byla zasunuta rovina atomů. Tato vložená vrstva atomů vyvolá nad rovinou kluzu tlakové napětí a pod ní tahové napětí. Hrana vložené vrstvy atomů se nazývá dislokační čarou, která je v tomto případě kolmá ke směru pohybu.

Vznik šroubové dislokace si můžeme popsat jako nařínutí krystalu v rovině kluzu, kde jedna jeho část se posune rovnoběžně vzhledem k té druhé. Přitom se vodorovné roviny krystalů zakříví a okraj každé z nich se přimkne k okraji nejbližší sousední roviny. Pak se celý systém rovnoběžných rovin deformuje ve šroubovou plochu. Konec skluzového řezu nazýváme dislokační čarou, která je v tomto případě rovnoběžná se směrem kluzu.

Ve skutečnosti se ale hranové a šroubové dislokace vzájemně kombinují, takže dislokační čára má pak obecný tvar. Základním kritériem pro posouzení dislokací je jejich hustota vztažená na délku dislokační čáry v jednotce plochy průřezu.



Obr. 5.2.2 Závislost změny napětí v kluzu na hustotě dislokací

a – oblast, které se dosahuje při tváření za studena

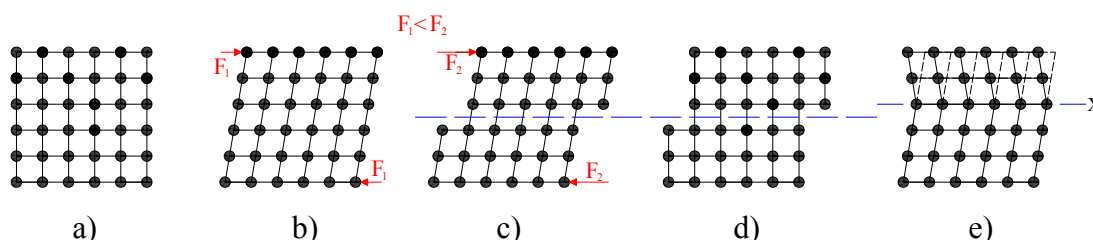
Z průběhu této závislosti je patrné, že nejmenší pevnost na mezi kluzu kovů je při kritické hustotě dislokací  $\rho_{\text{krit}}$ , ta se udává pro vyžíhané kovy přibližně  $10^7$  až  $10^8$  dislokací na  $1\text{cm}^2$ . Kovy tvářené za studena mají hustotu dislokací větší, protože jsou zpevněné. Zvýšení pevnosti lze také dosáhnout snížením hustoty dislokací, jak je patrné z levé části křivky.

## 5.3 Deformace a jejich vznik

Pojmem deformace tělesa rozumíme změnu jeho tvaru. Těleso mění tvar v důsledku působení síly. Silové působení mění vzájemné polohy atomů, ze kterých se materiál skládá. V případě, že se po odstranění působící síly těleso vrátí do původního tvaru, mluvíme o pružné deformaci, neboli elastické deformaci. V důsledku působení sil může rovněž dojít k nevratným změnám v poloze atomů tělesa. Tvar tělesa se po odeznění působení síly již nevrátí do původního stavu. V takovém případě mluvíme o nepružné deformaci, neboli plastické deformaci. Síly působící na těleso lze rozlišovat podle druhu napětí, které v tělese vyvolávají na tahové, tlakové, smykové, ohybové nebo torzní. Neuvažuje-li se při popisu tělesa jeho deformace, mluvíme o tuhém tělese.

### 5.3.1 Deformace monokrystalů

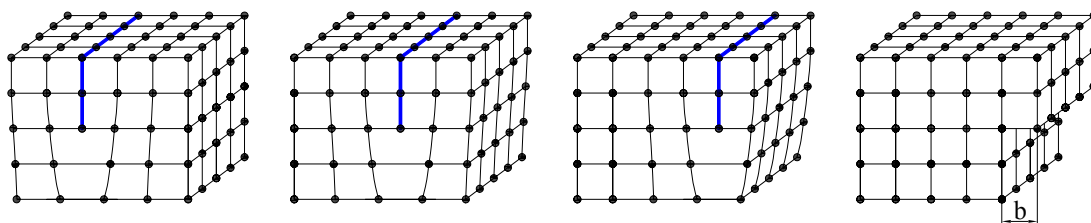
Jevy, které probíhají v kovech a jejich slitinách za působení vnějších sil, se pro snadné pochopení popisují na příkladu monokrystalů. Vnější síly vyvolávají v kovu deformaci krystalové mřížky. Pružná deformace nastává v okamžiku, kdy se po odlehčení vnější síly vychýlené atomy vrátí do původní polohy. Když ale vnější síly překročí určitou hranici, nastává trvalá deformace kovu (dojde k posunutí atomů o vzdálenost větší, než je jejich mřížková konstanta), která na rozdíl od pružné deformace nevymizí ani po odlehčení vnější síly. Podle obecné teorie mluvíme o trvalé deformaci tehdy, jestliže v průběhu namáhání nastane přemístění celé vrstvy atomů v krystalových rovinách současně. Při takové situaci hovoříme o kluzu vrstev atomů. Složitějším typem plastické deformace s kluzným mechanismem je dvojčatění (tvoření dvojčat), kdy se řady atomů natáčí proti sobě ve směru posuvu, až jsou symetrické k rovině dvojčatění X.



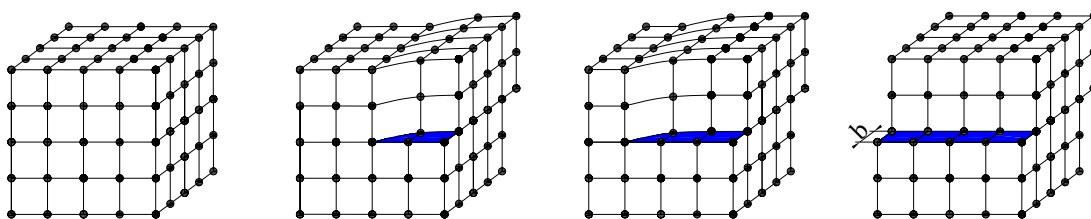
Obr. 5.3.1.1 a) Výchozí stav krystalové mřížky b) Pružná deformace c) Trvalá deformace d) Trvalá deformace po odlehčení vnější síly e) Tvoření dvojčat

Plastická deformace krystalů se tedy děje kluzem jedné vrstvy krystalů po druhé. Nejsnáze dochází ke kluzu v rovinách, které jsou nejhustěji obsazeny atomy.

Za předpokladu, že na plochách kluzu jsou dislokace, probíhá proces kluzu postupným posuvem dislokací. Na obrázcích je patrné, jak se vložená vrstva atomů postupně pohybuje, až vystoupí na povrch.



Obr. 5.3.1.2 Schéma kluzu vyvolané pohybem hranové dislokace



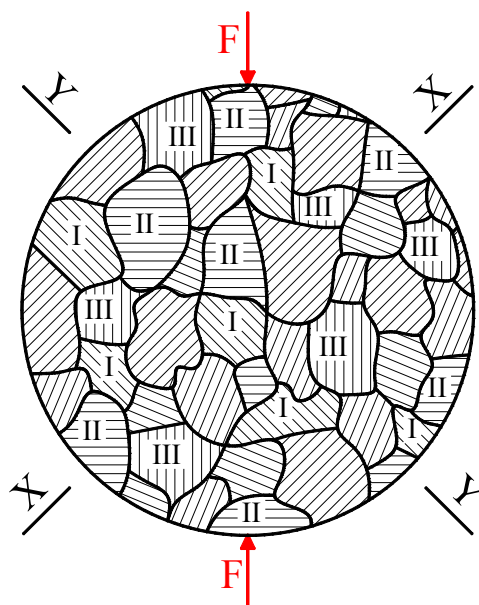
Obr. 5.3.1.3 Schéma kluzu vyvolané pohybem šroubové dislokace

Při svém pohybu probíhají dislokace celým krystalem a hromadí se na jeho hranicích. To ovšem neplatí v případech, kdy se buď dislokace zachytí za překážky uvnitř krystalu, nebo dojde-li při pohybu dislokace k jejímu zaklesnutí v různých rovinách. Pohyb těchto dislokací odpovídá určité vnější síle a určité plastické deformaci. V momentě, kdy se pohyb dislokací zastaví, je potřeba zvýšit napětí k vyvolání další plastické deformace, aby se zachycené dislokace v kluzných rovinách odtrhly od překážek, které jim brání v pohybu, nebo aby se uvedly v pohyb jiné volné dislokace umístěné v méně příznivě orientovaných kluzných rovinách. Kovy mají tu vlastnost, že proti pokračující plastické deformaci zvyšují odpor, potom o nich tvrdíme že zpevňují.

### 5.3.2 Deformace polykrystalů

Průběh deformace, který byl popsán u monokrystalů, lze do jisté míry aplikovat i na procesy při deformaci polykrystalů. Různá orientace zrn a zejména jejich hranic má výrazný vliv na kluz a místa vzniku kluzu.





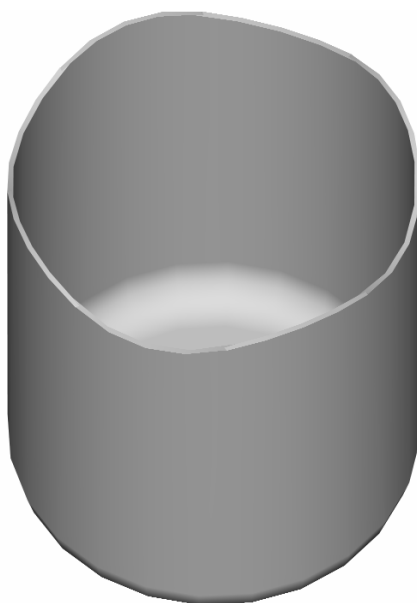
Obr. 5.3.2.1 Schéma orientace zrn u polykrystalu

Při stlačování vznikne největší kluzové napětí v rovinách (I) orientovaných pod úhlem  $45^\circ$  ke směru působení těchto vnějších sil. V rovinách (II a III), které mají kluzné roviny orientovány kolmo, respektive rovnoběžně, ke směru působení vnějších sil ke kluzu nedochází. Hranice zrn mají nepravidelné uspořádání atomů a představují přechodovou oblast mezi zrny. Oblast hranic zrn je přechodovou vrstvou mezi sousedními krystaly, je dezorientována a je místem vzniku poruch krystalové mřížky. Deformace v okolí hranic zrn jsou tudíž menší než uvnitř zrn. Z těchto uvedených důvodů vykazuje polykrystalický materiál značně větší odpor proti deformaci než monokrystalický.

### 5.3.3 Deformační zpevnění

Při tváření kovů za studena dochází k jeho zpevnění. Plastická deformace se uskutečňuje pohybem dislokací, který se ovšem postupně vyčerpá nahromaděním dislokací, a tento pohyb je omezen – dochází ke zpevnění materiálu. Teorie zpevnění vychází z předpokladu, že se některé dislokace úplně zablokují, a způsobí vznik vnitřního napětí, které pak zabrání v pohybu ostatním dislokacím. Hustota dislokací při zpevnění roste podle jisté závislosti (obr. 5.2.2). Navenek se zpevnění projevuje nárůstem pevnosti, tvrdosti, meze kluzu, a snížením tažnosti a vrubové houževnatosti.

Vlivem natáčení kluzných rovin ve směru působících sil dochází k prodlužování zrn ve směru deformace. Natáčením kluzných rovin a prodlužováním zrn ve směru kluzu zaniká (za vyšších deformací polykrystalů) původní uspořádání mřížkových rovin a směrů jednotlivých krystalů. Tím vzniká krystalová orientace usměrněná ve směru působící síly. Jestliže při tváření za studena dochází nejen k prodlužování zrn, ale i k uměrnování jejich krystalografických os, vzniká textura. Tato textura způsobuje, že materiálové vlastnosti jsou závislé na krystalové orientaci, a liší se v různých směrech. Mluvíme pak o tom, že materiál má anizotropní vlastnosti, což bývá nežádoucím jevem. Důsledkem je například tvoření cípů při tažení.



Obr. 5.3.3.1 Tvorba cípů na výtažcích

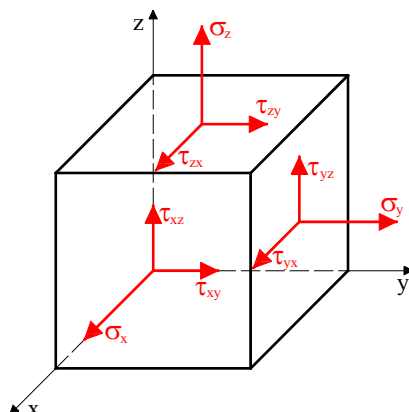
## 5.4 Mechanika tvářecích pochodů

Základním úkolem mechaniky tvářecích pochodů je stanovení napětí a deformací vzniklých působením vnějších sil na deformovaný materiál.

### 5.4.1 Stav napjatosti

Stav napjatosti v obecném případě je určen třemi normálními a šesti smykovými napětími. Z deformovaného tělesa, na které působí vnější síly, vydělíme elementární krychli s hranami ležícími v soustavě pravoúhlých os. Pak normální napětí působící v řezech kolmých k osám  $x$ ,  $y$ ,  $z$  označujeme  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  a smyková napětí působící v řezech označujeme  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{yz}$  a  $\tau_{zy}$ . První index u

smykových napětí vyjadřuje směr s danou osou, druhý index určuje stěnu krychle ve které působí.



Obr. 5.4.1.1 Normální a smyková napětí na hranicích elementární krychle

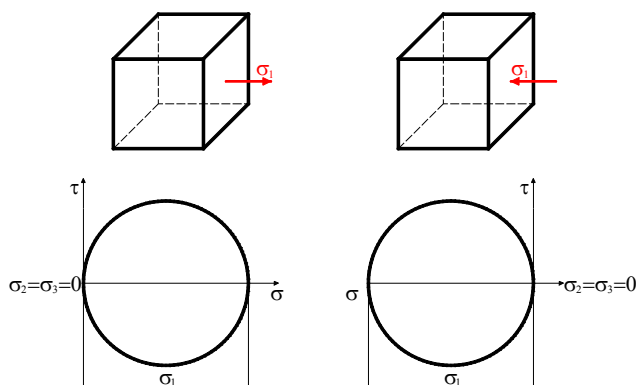
V podmínkách rovnováhy elementární krychle jsou smyková napětí působící ve dvou navzájem kolmých řezech stejná a mají takový směr a smysl, že obě směřují buď ke společné hraně roviny ve které působí, nebo směřují do ní, to znamená, že:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \tau_{xz} = \tau_{zx}; \tau_{yz} = \tau_{zy}. \quad (5.4.1.1)$$

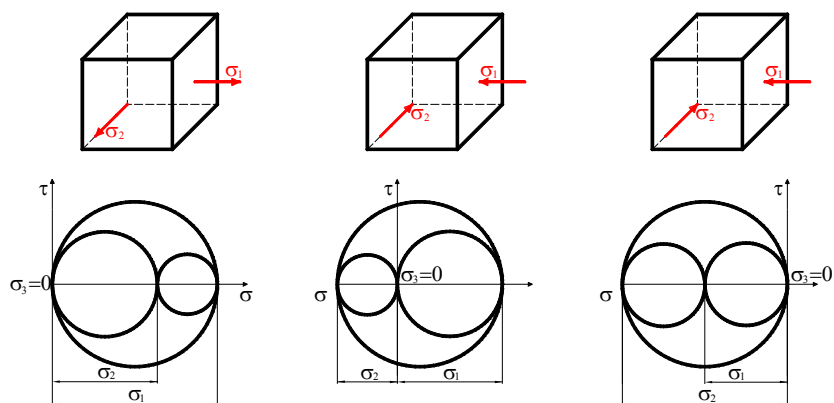
Z toho vyplývá, že napjatost v libovolném bodě tvářeného tělesa může být stanovena šesti složkami napětí, a to třemi normálními  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  a třemi smykovými  $\tau_x$ ,  $\tau_y$ ,  $\tau_z$ . Jestliže hlavní osy mají takovou polohu, že smyková napětí  $\tau$  si odpovídají, potom jsou tato napětí stejně velká, působí proti sobě a tím pádem se ve svých účincích navzájem vylučují. Plochy, na kterých jsou si smyková napětí rovna, se nazývají hlavními plochami. V každém bodě tvářeného tělesa se mohou protínat tři takové hlavní plochy. Normály těchto ploch se nazývají hlavními směry napjatosti a samotná napětí jsou hlavními napětími, označují se  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ . Přitom  $\sigma_1$  označuje největší napětí,  $\sigma_3$  naopak nejmenší napětí a  $\sigma_2$  střední napětí ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ). Stav napjatosti tělesa může být jednoosý, rovinný a prostorový. Při jednoosé napjatosti jsou dvě hlavní napětí rovna nule, při rovinné napjatosti jen jedno je rovno nule a u prostorové se žádné hlavní napětí nerovná nule. Kromě toho mohou být schémata napětí stejnojmenná a nestejnojmenná. Ve stejnojmenných schématech mají napětí stejný smysl. Z uvedeného přehledu vyplývá, že existuje celkem devět základních schémat napětí.

V řadě úloh z plasticity a při řešení některých technologických procesů tváření je používáno tzv. ukazatele stavu napjatosti. Jeho geometrický a fyzikální

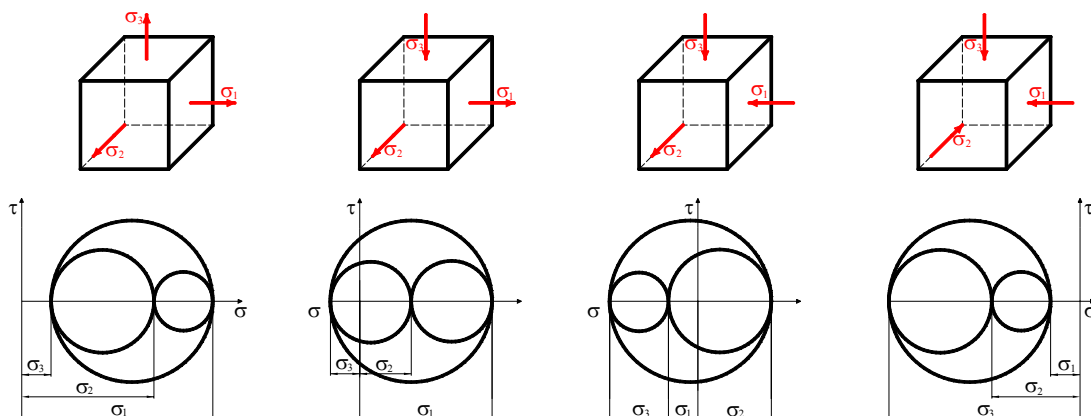
význam vyplývá z Mohrova diagramu prostorové napjatosti. Schéma napjatosti ovlivňuje tvárnost deformovaného materiálu. Čím větší vliv mají napětí tahová, tím je materiál méně tvárný.



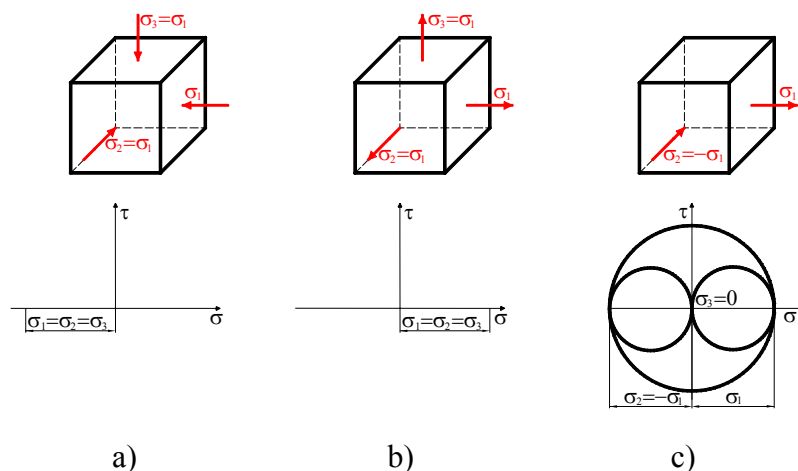
Obr. 5.4.1.2 Jednoosá napjatost



Obr. 5.4.1.3 Rovinné stavy napjatosti



Obr. 5.4.1.4 Prostorové stavy napjatosti



Obr. 5.4.1.5 Zvláštní případy napjatosti a) Všestranný rovnoosý tlak b) Všestranný rovnoosý tah c) Čistý smyk

## 5.4.2 Schémata hlavních deformací

Tato schémata nám dávají představu o stavu deformace v uvažovaném bodě. Hlavními deformacemi jsou deformace v hlavních rovinách, ve kterých nejsou žádná smyková napětí. Stav deformace je pak charakterizován vydělenou krychlí s třemi složkami hlavních deformací  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ . Závislost mezi hlavními deformacemi se stanoví z podmínky rovnosti objemu, který říká, že při tváření se velikost objemu nemění. Pak pro tváření hranolu, který měl před deformací rozměr  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $c_0$  a po tváření  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $c_1$ , platí:

$$a_0 \cdot b_0 \cdot c_0 = a_1 \cdot b_1 \cdot c_1, \quad (5.4.2.1)$$

$$\frac{a_1}{a_0} \cdot \frac{b_1}{b_0} \cdot \frac{c_1}{c_0} = 1. \quad (5.4.2.2)$$

Jednotlivé poměry ve výše uvedeném vztahu charakterizují rozměrové změny v příslušných směrech, a logaritmováním dostaneme:

$$\ln \frac{a_1}{a_0} + \ln \frac{b_1}{b_0} + \ln \frac{c_1}{c_0} = 0. \quad (5.4.2.3)$$

Hodnoty logaritmů charakterizují deformace se nazývají skutečnými nebo logaritmickými deformacemi, a označují se písmenem  $\varphi$ , takže také platí:

$$\varphi_a + \varphi_b + \varphi_c = 0. \quad (5.4.2.4)$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že součet deformací ve třech hlavních směrech se rovná nule:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0. \quad (5.4.2.5)$$

Jinak řečeno – jedna ze tří deformací je vždy rovna součtu ostatních dvou a má opačné znaménko. V případě, že se jedna deformace rovná nule, budou zbylé dvě sobě rovny a opačných směrů. Existují proto jen tři druhy schémat deformací. Mechanická schémata deformace představují spojení schémat hlavních napětí a deformací, a jsou základním ukazatelem při hodnocení tvářecích pochodů.

### 5.4.3 Podmínky vzniku plastické deformace

Pro uskutečnění plastické deformace je třeba znát podmínky, při kterých dochází u kovů k přechodu z pružné deformace v deformaci trvalou. Nejrozšířenější podmínkou pro stanovení plasticity je podmínka maximálních smykových napětí a energetická podmínka.

Podmínka maximálních smykových napětí definuje, že k plastické deformaci dochází v okamžiku, kdy kterékoliv jedno z hlavních smykových napětí  $\tau_{\max}$  dosáhne poloviny meze kluzu, nebo v momentě, kdy jeden z rozdílů hlavních dvou normálních napětí je roven mezi kluzu, a to nezávisle na hodnotě rozdílů druhých dvou hlavních napětí:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_k}{2}, \quad (5.4.3.1)$$

kde:

$\sigma_k$  ..... Skutečná mez kluzu s přihlédnutím k zpevnění materiálu, rychlosti deformace atp. [MPa].

Tato teorie, jak je patrné z výše uvedeného vztahu, neuvažuje vliv napětí  $\sigma_2$  a předpokládá rovinnou napjatost.

Energetická podmínka plastické deformace zase předpokládá, že materiál přechází do plastického stavu, když intenzita napětí v libovolném bodě tělesa převyší mez kluzu. Přejít do plastického stavu není závislé na povaze napjatosti, a dojde k němu v okamžiku, kdy změna tvaru dosáhne jisté velikosti.

Potenciální energie  $E_{p1}$ , nahromaděná v okamžiku přechodu kovu do plastického stavu, je dána rozdílem mezi potenciální energií deformace  $E_{p2}$  a potenciální energií pružné změny objemu tělesa  $E_p$ :

$$E_{p1} = E_{p2} - E_p, \quad (5.4.3.2)$$

$$E_{p1} = \frac{1+\mu}{\sigma \cdot E} \cdot \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right], \quad (5.4.3.3)$$

kde:

$E_p$  ..... Potenciální energie [J],

$E$  ..... Modul Pružnosti [MPa],

$\mu$  ..... Poissonovo číslo [-].

V případě jednoosé napjatosti ( $\sigma_1=\sigma_3=0$ ) bude potenciální rovnice deformace:

$$E_{pl} = \frac{1+\mu}{3 \cdot E} \cdot \sigma_k^2. \quad (5.4.3.4)$$

Vzhledem k tomu, že potenciální energie změny tvaru nezávisí na schématu napjatosti z podmínky obou výše zmíněných rovnic, dostáváme základní rovnici tvárnosti ve tvaru:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 \cdot \sigma_k, \quad (5.4.3.5)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_k, \quad (5.4.3.6)$$

kde:

$\sigma_i$  ..... Intenzita napětí vyjadřující současný účinek jednotlivých složek napjatosti, která určuje velikost deformačního odporu materiálu proti změně tvaru [MPa].

Při plastickém stavu je tedy intenzita napětí  $\sigma_i = \sigma_k$ . Energetická podmínka plastické deformace zahrnuje i vliv středního hlavního napětí  $\sigma_2$ . Za předpokladu, že  $\sigma_2 = \sigma_1$  nebo  $\sigma_2 = \sigma_3$ , dostaneme rovnici tvárnosti ve tvaru:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_k. \quad (5.4.3.7)$$

Jestliže střední napětí bude:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad (5.4.3.8)$$

pak po dosazení do základní rovnice tvárnosti bude mít tvar:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_k. \quad (5.4.3.9)$$

Analogicky k obecnému stavu napjatosti lze i pro obecný tvar deformace odvodit rovnici pro intenzitu deformace:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (5.4.3.10)$$

kde:

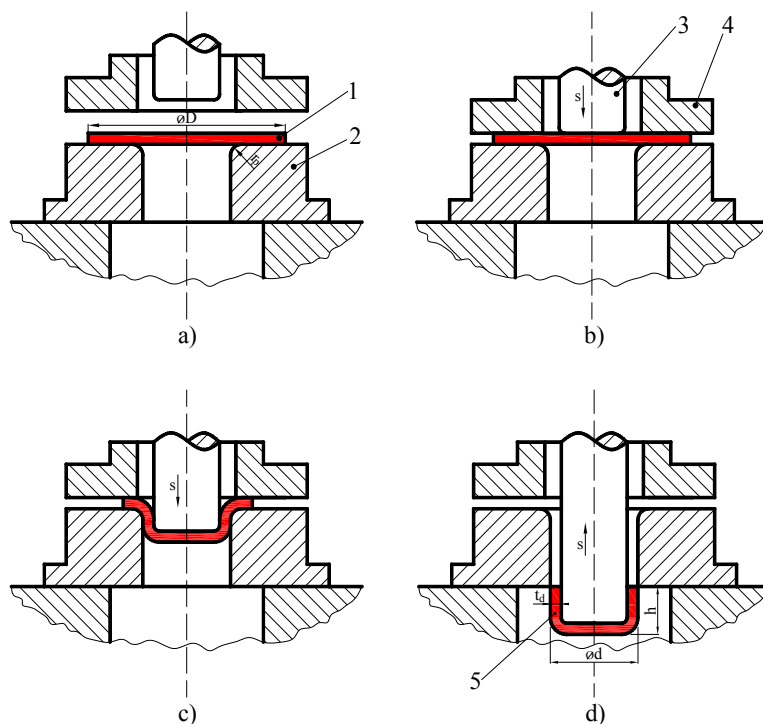
$\varepsilon_i$  ..... Intenzita deformace představující celkový deformační účinek intenzity napětí. Charakterizuje velikost a průběh změny tvaru plasticky tvářeného materiálu ve zvoleném bodě tělesa. [-].

## 5.5 Tažení

Tažení je trvalé přetvoření rovinné plochy plechu v plochu dutého prostorového tělesa. Je to proces spadající do skupiny plošného tváření, při kterém se dosahuje požadovaného tvaru výlisku bez podstatné změny tloušťky výchozího materiálu.

### 5.5.1 Tažení jednoduchých výtažků z kruhového přístřihu

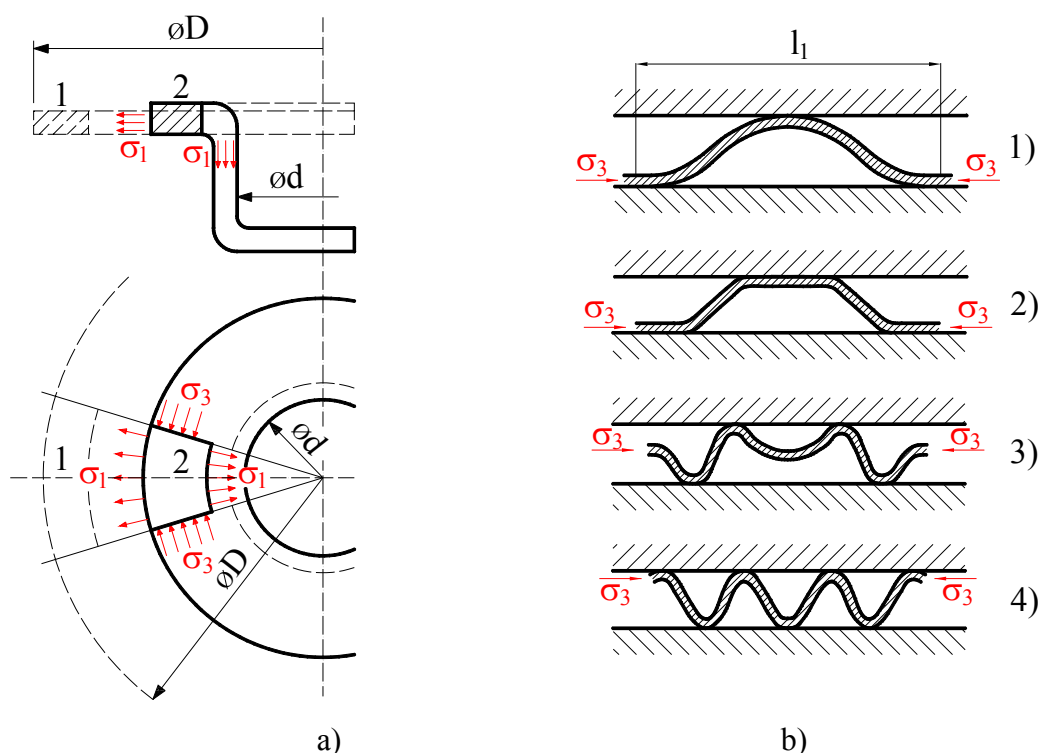
Schéma postupu tažení válcové nádoby, má čtyři fáze. V první fázi se založí kruhový přístřih o průměru  $D$  na tažnici. V druhém kroku je přístřih přitlačen přidržovačem, a tažník se pohybuje směrem k materiálu. Pak dochází k vlastnímu procesu tažení, kdy tažník protahuje přístřih přes otvor tažnice, který je zaoblen poloměrem  $r_p$ . Po vytažení požadovaného tvaru nádoby o průměru  $d$ , výšce  $h$  a tloušťce  $t$  se tažník vrací do své výchozí polohy.



Obr. 5.5.1.1 Schéma tažení; 1 – výchozí plech; 2 – tažnice; 3 – přidržovač;  
4 – tažník; 5 – výtažek



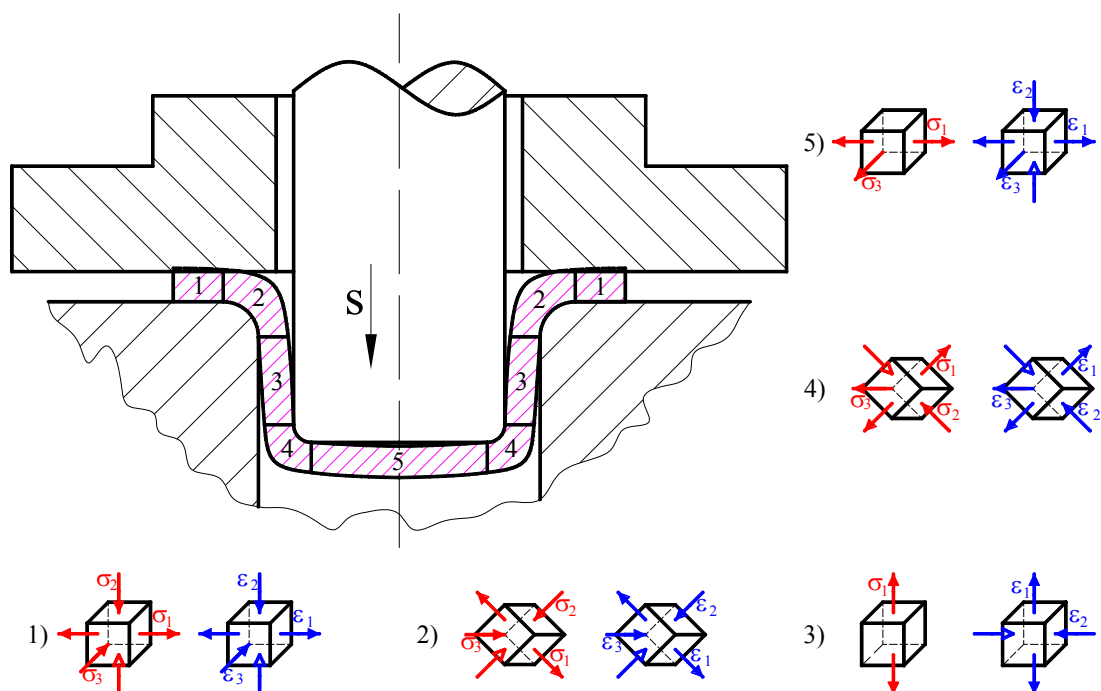
Při tažení dochází k poměrně složité plastické deformaci, při které výchozí materiál 1 mění své rozměry tak, že se v radiálním směru prodlužuje a v tečném směru zkracuje, zároveň se také nepatrně zvětšuje jeho tloušťka a tím se materiál přemístí do polohy 2. Na začátku tažení dochází ve výchozím materiálu 1 k největší deformaci v tečném směru, střední v radiálním směru a nejmenší deformaci dochází ve směru tloušťky materiálu. Při posunutí přístřihu směrem do polohy 2 tažné hrany tažnice dochází postupně k nárůstu radiální deformace na úkor tečné deformace. Při přechodu materiálu přes hranu tažnice nastává ještě k výše uvedeným deformacím prostorový ohyb (Obr. 5.5.1.2a). Poté materiál přechází ve válcovou stěnu a je prodlužován ve směru osy tažníku s nepatrným ztenčováním stěny. Vlivem napětí v tečném směru může dojít k zvlnění taženého polotovaru. Tvoření vln je závislé na tloušťce stěny, materiálu polotovaru a na stupni deformace. Schéma postupu tvoření vln je nastíněno na obrázku (Obr. 5.5.1.2b).



Obr. 5.5.1.2 Deformace během tažení a) Schéma přemísťování materiálu b) Schéma tvoření vln

Rozbor tažení válcové nádoby v tažidle s přidržovačem a s mechanickými schémata deformace je zobrazen na obrázku (Obr. 5.5.1.3). Je patrné, že mechanická schémata deformace se mění v různých fázích tažení, a s tím se mění i velikost napětí a deformací. V oblasti 1 vzniká vlivem tlaku přidržovače prostorová napjatost i

deformace, a to konkrétně radiální tahová napětí  $\sigma_1$ , tečná tlaková napětí  $\sigma_3$  a k nim v kolmém směru osová tlaková napětí  $\sigma_2$ . Na poloměru tažnice v oblasti 2 vzniká deformace způsobená prostorovým ohybem, za současného působení největšího radiálního tahového napětí  $\sigma_1$ , a malého tečného tlakového napětí  $\sigma_3$ . Válcová část výtažku v oblasti 3 je zatížena jednoosou tahovou napjatostí  $\sigma_1$  a rovinnou deformací. V místě zaoblení – oblast 4, ve kterém přechází válcová část v dno výtažku, je prostorové nestejnorodé napětí, které způsobuje značné prodloužení a ztenčení. Tato oblast je nejnáchylnější k vzniku porušení soudružnosti materiálu. Ve dně výtažku – oblast 5, vzniká během tažení rovinná tahová napjatost a prostorová deformace.

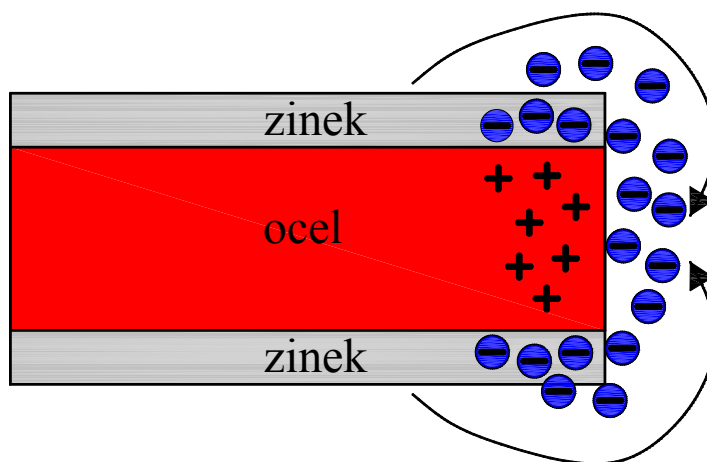


Obr. 5.5.1.3 Mechanická schémata napětí a deformací při tažení

O charakteru změn, které vznikají během tažení, je možno získat představu při porovnání tloušťky a struktury výtažku v jeho různých místech. Stupeň deformace vzrůstá ode dna výtažku směrem k hornímu okraji. Proto také okraje vykazují největší zpevnění na výtažku. Také tloušťka stěny výtažku není ve všech místech stejná. Změna tloušťky stěny výtažku závisí na jeho tvaru, stupni deformace, mazání, nástroji, materiálu, původní tloušťce a na počtu tahů, přičemž platí, že při jednonásobném tažení je zeslabení dna zanedbatelné, ovšem při postupovém tažení dojde k jejímu výraznějšímu zeslabení.

## 6 Pozinkované plechy

[25-28] Pozinkované plechy jsou vrstveným materiálem, ve kterém se optimální mechanické vlastnosti oceli spojují s ochranným účinkem zinkové vrstvy proti korozi. Ochranným mechanismem zinkové vrstvy je katodická ochrana, která spočívá ve schopnosti přesunu iontů zinku na poškozenou část ocelového plechu. Při působení dešťové vody, kondenzátu a jiných elektrolytů se mezi dvěma různými kovy tvoří galvanický článek. V tomto místě vznikne rozdíl napětí, a méně ušlechtilý kov (zinek) přechází jako anoda do roztoku, to znamená, že zinek se vzhledem k normálnímu potenciálu chová jako spotřebovávaná anoda a chrání tak základní materiál. Přechod mezi zinkem a ocelí není v jednom místě, nýbrž je pozvolný a má několik fází.

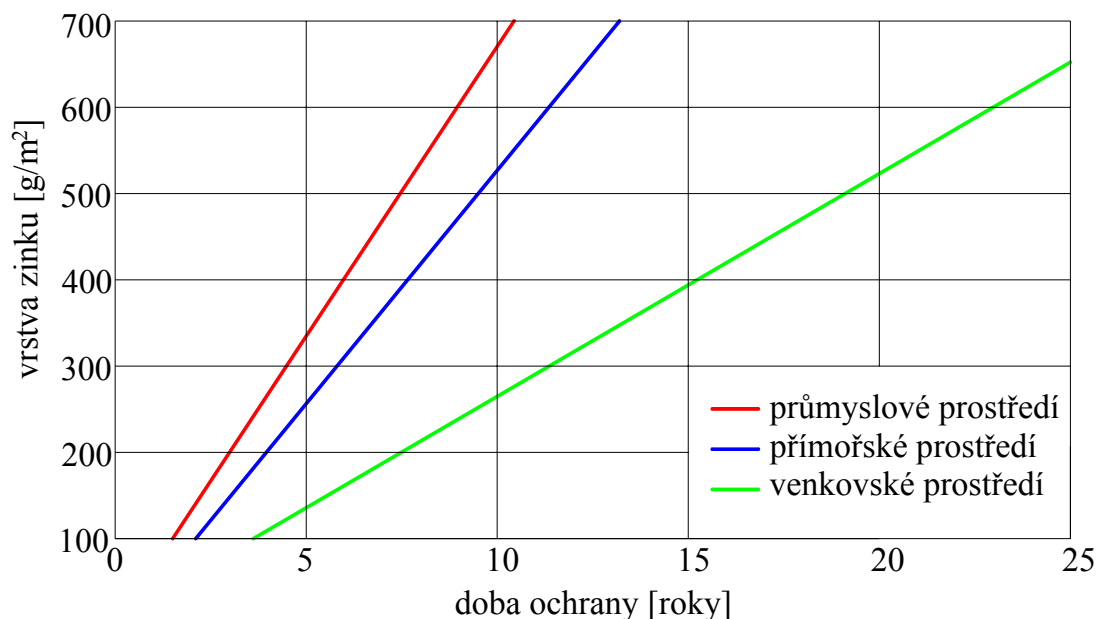


Obr. 6.1 Schéma katodické ochrany zinkem

Klasické způsoby spojování, jako je nýtování, spojování šrouby, vroubkování, obrubování apod., lze bez problémů používat, protože těmito způsoby není ohrožen ochranný účinek zinku proti korozi. Při spojování s jinými kovy je nutno přihlížet k tomu, že při vzniku elektrochemického článku vzniká nebezpečí kontaktní koroze. Běžné způsoby tavného svařování lze používat i u pozinkovaných plechů. Nevýhodou je zde však porušení zinkové vrstvy v místě sváru. Proto je doporučeno provést dodatečnou ochranu zinkovým nátěrem. Pro svařování se spíše doporučuje odporové svařování, při němž zůstává ochrana proti korozi do značné míry zachována.

Na povrchu zinku se tvoří již po krátké době působením vlhkosti šedá, silně ulpívající vrstva z oxidačních produktů zinku, říkáme jí zinková patina. Tento povlak je na vnější straně trvale odbouráván a současně je ze zinku pod ním doplňován.

Doba trvání této ochrany je tedy závislá na tloušťce zinkové vrstvy a parametrech vnějšího prostředí.



Obr. 6.2 Orientační graf závislosti doby zinkové ochrany na její vrstvě

Horším případem tvorby zinkové patiny je stav, kdy se v důsledku nedostatečného přivádění vzduchu nemůže odpařovat voda. Kapilárním účinkem u těsně na sobě ležících plechů pak proniká kondenzovaná voda hluboko do stohu plechů nebo svitků. Tímto dochází velmi rychle k odbourávání této patinové vrstvy a vzniku bílé rzi. Menší množství bílé rzi má pro ochranu proti korozi malý vliv. Pro svůj nápadný vzhled je však nežádoucí. Dle technologie výroby pozinkovaných plechů se dělí do dvou základních skupin.

## 6.1 Žárový pozink

Žárově pozinkovaná ocel se vyrábí kontinuálním způsobem. Ocelový plech válcovaný za studena je jako základní materiál průběžně čištěn, žihán a v roztavené zinkové lázni pozinkován. Oboustranný nános zinku má nastavenou tloušťku pomocí tryskového stírání. Gramáž zinkové vrstvy u žárově pozinkovaných plechů se pohybuje v rozsahu 60 až 450 g/m² vždy oboustranně. Tloušťka zinkové vrstvy je v rozsahu 10 až 25 µm.

V průběhu tuhnutí zinku se vytváří typická struktura povrchu, které se říká zinkové květy. Velikost zinkových květů lze řídit cíleným ovlivňováním tuhnutí vrstvy zinku, případně chemického složení zinkové lázně. Tímto způsobem lze

dosáhnout povrchu bez zinkových květů, stejně jako povrchů s různými zinkovými květy. Běžné zinkové květy toto provedení se získá při neovlivňování tuhnutí zinkového povlaku. Záměrným ovlivňováním zinkové vrstvy během tuhnutí se vytvoří velké množství malých zinkových květů. Tím se dosáhne povrchu stejnoměrného vzhledu. Plech se také může dodatečně válcovat touto úpravou jsou zinkové květy v jejich nejvyšší vrstvě zarovnány a dosáhne se stejnoměrného šedého, matného povrchu.

## 6.2 Elektrolytický pozink

Výhodou oproti žárovému pozinku je to, že materiál nezatěžujeme tepelně, takže ho nežíháme a tím neztrácíme tažnost. Princip výroby je založen na elektrolytickém ději, při kterém se na elektrovodivé materiály, ve většině případů železné díly (katoda), elektrochemicky vyloučí zinkový povlak rozpuštěním zinku (anody). Protože kvalita vstupního materiálu má zásadní vliv na vizuální vlastnosti výrobku, je nutné ho předem zbavit hrubých okují, barvy nebo hloubkové rzi. Jedině tak dosáhneme hladké a lesklé zinkové vrstvy. Standardní tloušťka zinkového povlaku elektrolytické technologie se pohybuje v rozmezí 8 až 12  $\mu\text{m}$ . Korozní odolnost zinkových povlaků je definována zkouškou v korozní komoře.

## 7 Experimentální část

### 7.1 Cíl experimentální části

Cílem experimentální části je zjistit, zda existuje spojitost mezi deformací, která vznikne při lisování na výtažku, a termograficky naměřenou teplotou tohoto výtažku následující ihned po operaci lisování. Vycházíme tedy z předpokladu, že velikost vzniklé deformace bude úměrná teplotě. Pro zjištění této spojitosti se prováděli tři nezávislé experimenty. Prvním bylo termografické měření tahové zkoušky, kde by se měla projevit měřená teplota vzniklá pouze od deformace vzorku. Druhým bylo měření na tribologické zkušebně, kde se měří teplota vzniklá od tření, což má simulovat tření mezi výtažkem a dutinou formy při tažení. A konečně třetí experiment bylo termografické měření teploty vytaženého kelímku kde se projeví jak teplota vzniklá z deformace, tak teplota od tření. Pro experimenty byl zvolen hlubokotažný materiál DX53D+ZE tloušťky 0,81mm. Jedná se o běžně zpracovávaný materiál.

**DX53D+ZE**

- elektrolyticky pozinkovaný plech
- povrch upravený ponorem v tavidle
- rozlišení jakosti oceli
- způsob válcování (za tepla či za studena) není předepsán
- ploché ocelové výrobky k tváření za studena

Tento materiál má podle normy EN 10 142 předepsány tyto hodnoty:

1)mechanické:

mez kluzu  $R_e=180\text{MPa}$ ,

mez pevnosti  $R_m=270$  až  $330\text{MPa}$ ,

tažnost  $A_{80}=40\%$  min.

2)chemické:

uhlík  $C=0,06\%$  max.,

mangan  $Mn=0,35\%$  max.,

fosfor  $P=0,025\%$ ,

síra  $S=0,025\%$ .

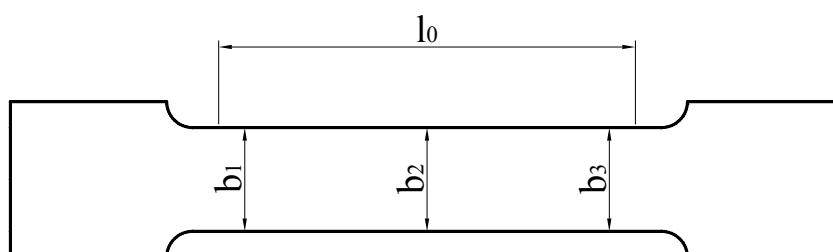
Než přistoupíme k vlastnímu termografickému měření, musíme si nejprve zjistit všechna potřebná data o tomto materiálu, která později využijeme pro simulaci v prostředí PAM-Stampu 2G. Tato data získáme z tahových zkoušek.

## 7.2 Zjištění materiálových dat vzorku

Nejprve byla provedena zkouška na zjištění normálové anizotropie, za okolní teploty 20°C, podle normy ČSN EN 10002-1 do deformace 20%. Vlastní měření bylo uskutečněno na trhacím zařízení TIRAtest 2300 (Obr. 7.2.1), a k vyhodnocení se využilo softwaru LabTest v.3.20.2126. Počáteční měřená délka je  $L_0=80$  mm, a velikost deformace byla měřena pomocí externího průtahoměru MFN-A 500.



Obr. 7.2.1 TIRAtest 2300



Obr. 7.2.2 Zkušební tyčka

Tab. 7.2.1 Naměřené a vypočtené hodnoty anizotropie

směr odběru	vzorek číslo	před deformací					po deformaci					r	Ør	$\bar{r}$
		b <sub>01</sub>	b <sub>02</sub>	b <sub>03</sub>	Øb <sub>0</sub>	l <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	Øb	l			
0°	1	20,10	20,10	20,10	20,10	79,9472	17,95	17,85	17,90	17,90	96,4574	1,614	1,702	1,680
	2	20,11	20,11	20,11	20,11	79,9930	17,91	17,79	17,88	17,86	96,4596	1,731		
	3	20,11	20,10	20,11	20,11	80,0138	17,90	17,80	17,91	17,87	96,2704	1,759		
45°	1	20,10	20,10	20,10	20,10	79,9728	18,09	17,95	18,05	18,03	96,2372	1,422	1,444	
	2	20,11	20,10	20,10	20,10	79,9692	17,98	17,96	18,11	18,02	96,2104	1,455		
	3	20,10	20,10	20,10	20,10	80,0212	18,05	17,96	18,06	18,02	96,1808	1,456		
90°	1	20,11	20,11	20,10	20,11	80,0208	17,75	17,67	17,79	17,74	96,2182	2,129	2,129	
	2	20,10	20,10	20,10	20,10	79,9806	17,77	17,63	17,76	17,72	96,2504	2,131		
	3	20,10	20,10	20,10	20,10	80,0198	17,82	17,69	17,71	17,74	96,1464	2,128		

$$r = \frac{\ln\left(\frac{b_0}{b}\right)}{\ln\left(\frac{l \cdot b}{l_0 \cdot b_0}\right)}, \quad (7.2.1)$$

$$\bar{r} = \frac{1}{4} \cdot (r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}), \quad (7.2.2)$$

kde:

r ..... Směrová anizotropie [-],

b<sub>0</sub> ..... Počáteční šířka zkušební tyčky [mm],

b ..... Šířka zkušební tyčky po deformaci 20% [mm],

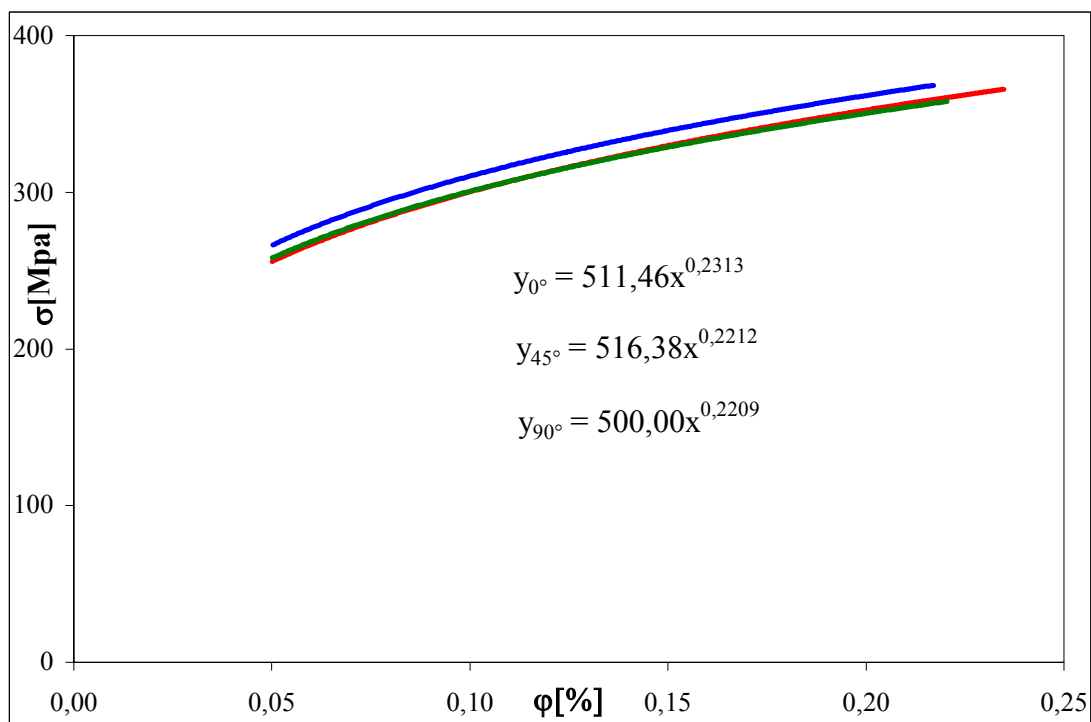
l<sub>0</sub> ..... Počáteční délka měřeného úseku [mm],

l ..... Délka měřeného úseku po deformaci 20% [mm],

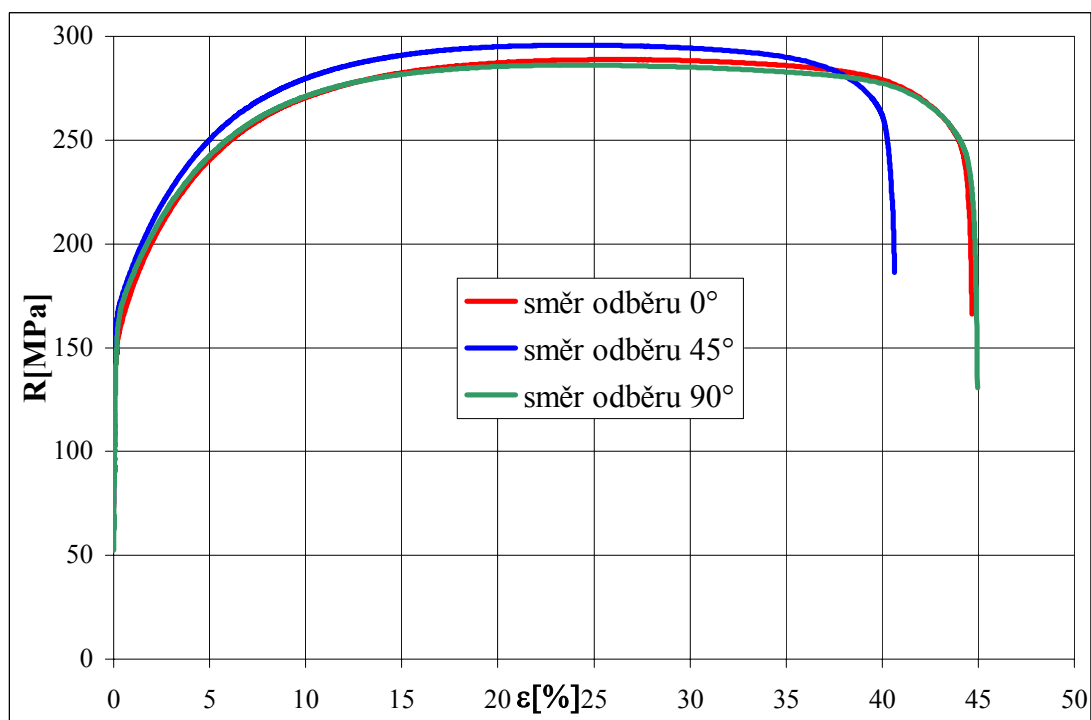
$\bar{r}$  ..... Normálová anizotropie [-].

Pro zjištění dalších materiálových konstant byla dále provedena tahová zkouška, podle normy ČSN EN 10002-1, až do porušení soudružnosti materiálu. Vyhodnocení bylo provedeno podle ČSN EN 10130, kdy se aproximuje od  $\varphi=5\%$  až po  $R_m$ , což je výhodné i pro numerické simulace, protože se aproximuje prakticky celá oblast plastické deformace. Ostatní podmínky platily obdobně jako při měření normálové anizotropie.





Obr. 7.2.3 Aproximace podle normy ČSN EN 10130 na zjištění materiálových dat



Obr. 7.2.4 Ukázkový graf závislosti smluvního napětí na prodloužení pro tři směry odběru vzorku

Tab. 7.2.2 Vypočtené hodnoty materiálových konstant

vzorek číslo	směr odběru					
	0°		45°		90°	
	c[MPa]	n[-]	c[MPa]	n[-]	c[MPa]	n[-]
1	511,5	0,2313	516,4	0,2212	500,0	0,2209
2	509,5	0,2318	508,4	0,2239	489,3	0,2245
3	515,3	0,2286	515,3	0,2234	499,7	0,2213
Ø	512,1	0,2306	513,4	0,2228	496,3	0,2222
$\bar{c}$ [MPa]	508,8					
$\bar{n}$ [-]	0,2246					
$\bar{\varphi}_0$ [-]	0,003409					

Tab. 7.2.3 Naměřené hodnoty smluvní meze kluzu

směr odběru	vzorek číslo	$R_{p0,2}$ [MPa]
0°	1	153,4
	2	151,4
	3	159,0
45°	1	165,0
	2	158,0
	3	162,7
90°	1	157,7
	2	148,5
	3	159,0
Ø		157,2

$$\bar{c} = \frac{1}{4} \cdot (c_{0^\circ} + 2 \cdot c_{45^\circ} + c_{90^\circ}), \quad (7.2.3)$$

$$\bar{n} = \frac{1}{4} \cdot (n_{0^\circ} + 2 \cdot n_{45^\circ} + n_{90^\circ}), \quad (7.2.4)$$

$$\bar{\varphi}_0 = \sqrt[n]{\frac{R_{p0,2} \cdot (1 + 0,002)}{\bar{c}}} - \ln(1 + 0,002), \quad (7.2.5)$$

kde:

$n$  ..... Exponent deformačního zpevnění [-],

$c$  ..... Koefficient monotónního zpevnění [MPa],

$\varphi_0$  ..... Počáteční deformace [-].

### 7.3 Obecné podmínky při měření termokamerou Flir P65 Pal

Pro zpracování a úpravu naměřených termogramů bylo použito programu ThermaCAM QuickView 2.0.2.12, který je bezplatnou součástí všech dodávaných termovizních systémů. Tento program slouží pro přenos termogramů z kamer a pro

další jednoduché vyhodnocení, jako je změna barevné palety termogramu (v našem případě byla zvolena paleta IRON10), výčet informací o teplotách a detailní informace o sejmutém termogramu. V termogramech bylo nutné pomocí tohoto programu vybrat oblast hledání maximální teploty, a to proto, že ne vždy byla maximální teplota v místě vzorku, viz Obr. 7.4.6.1 vlevo, kde maximální teplota je na čelistech trhačky, nebo Obr. 7.5.3.2 vpravo kde maximální teplotu vykazuje vytlačený olej na okraji měřeného pásu. Vybranou oblast v termogramu označuje program jako Ar1 a maximální teplota v této oblasti je značená jako Sr1. První termografický obrázek z dané série zobrazuje vzorek v čase 0 s, poslední je vždy první snímek, při kterém došlo k porušení materiálu. Režim snímkování termokamery pracuje v režimu, kdy snímkuje s konstantním časovým krokem 4,2 s. Modře podbarvené hodnoty v tabulkách maximálních teplot vyjadřují vždy první termogram, na kterém došlo k ukončení zkoušky. U tahové zkoušky je to porušením soudružnosti vzorku, u tribologické zkoušky uplynutím dané dráhy. Emisivita byla určovaná na základě znalosti počáteční teploty vzorku, viz. kapitola 3.3.3, případ 1).

## 7.4 Měření tahové zkoušky termokamerou Flir P65 Pal

Při tomto měření byla termograficky měřena zkušební tyčka (Obr 7.2.2), která se zatěžovala až do meze pevnosti v tahu. Rychlost posuvu materiálu při lisování se v různém čase a místě mění. Na začátku tváření je maximální (cca 400 mm/s), naopak v dolní úvrati minimální (0mm/s). S ohledem na tuto skutečnost byla rychlost zkoušek volena v rozmezí 10 mm/min až 400 mm/s. Na zařízení TIRAtest 2300 (Obr. 7.2.1) to byly posuvy 10 mm/min, 50 mm/min, 100 mm/min, 600 mm/min a na zařízení Sokol 400 (Obr. 7.5.2) posuvy 50 mm/s, 100 mm/s, 200 mm/s a 400 mm/s. Hodnoty max. teplot v tabulkách jsou zprůměrované hodnoty z min. tří vzorků.

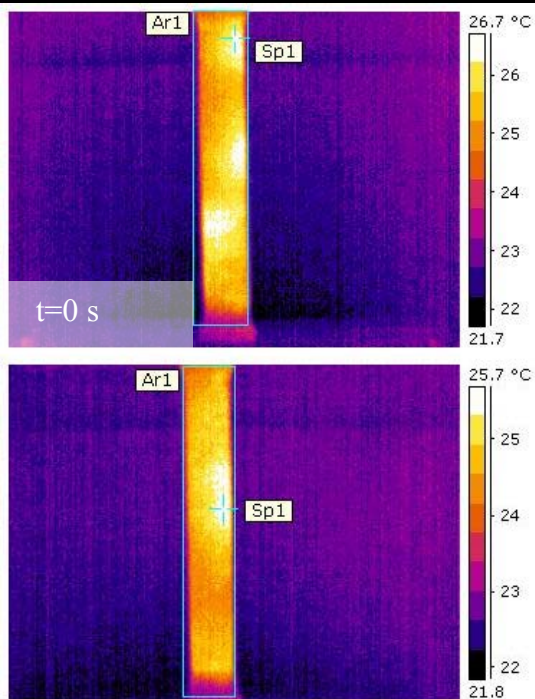
Tab. 7.4.1 Podmínky při měření tahové zkoušky na zařízení TIRAtest 2300 i na Sokol 400

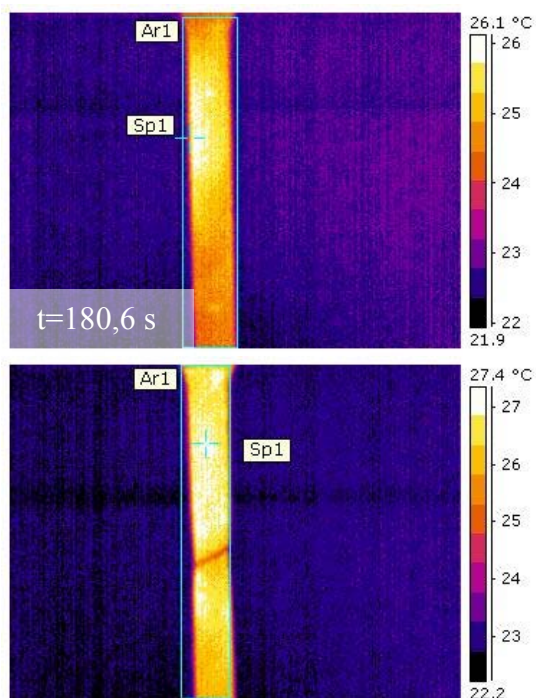
Parametry objektu		
Emisivita	0,75	[-]
Odražená teplota	22	[°C]
Atmosferická teplota	23	[°C]
Relativní vlhkost	55	[%]
Vzdálenost	0,5	[m]

### 7.4.1 Rychlost posuvu 10 mm/min

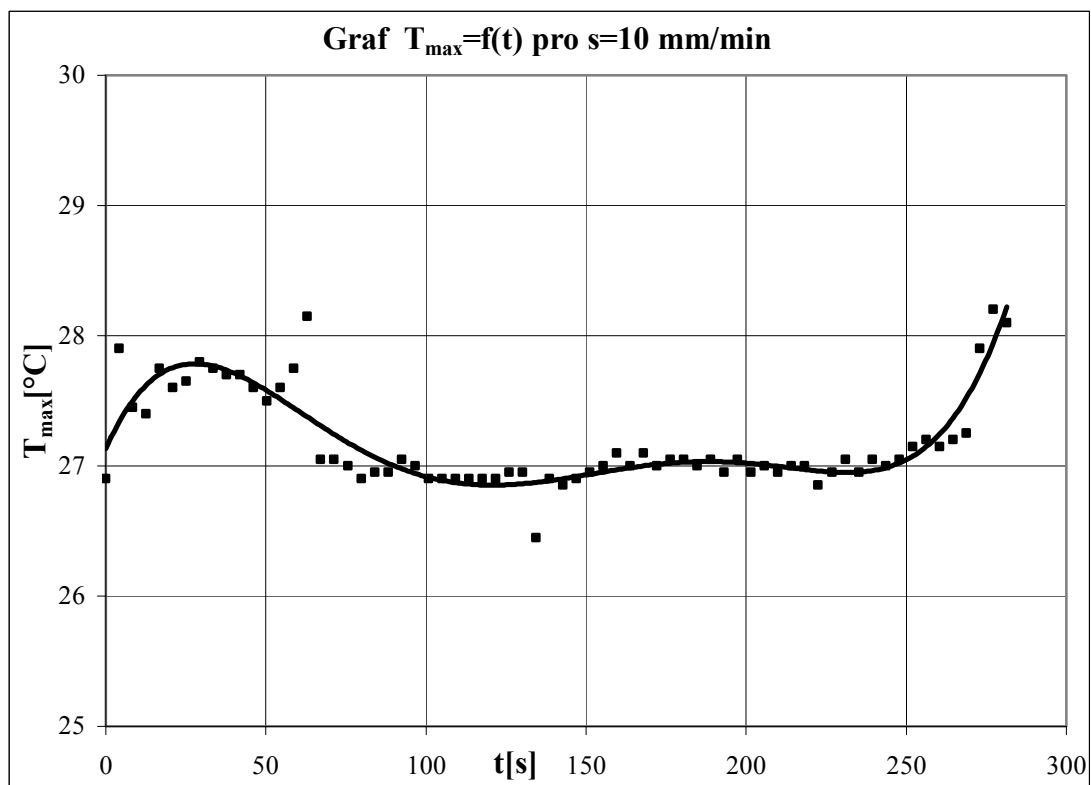
Tab. 7.4.1.1 Naměřené maximální teploty

t[s]	0,0	4,2	8,4	12,6	16,8	21,0	25,2	29,4	33,6	37,8	42,0	46,2
T <sub>max</sub> [°C]	26,9	27,9	27,5	27,4	27,8	27,6	27,7	27,8	27,8	27,7	27,7	27,6
t[s]	50,4	54,6	58,8	63,0	67,2	71,4	75,6	79,8	84,0	88,2	92,4	96,6
T <sub>max</sub> [°C]	27,5	27,6	27,8	28,2	27,1	27,1	27,0	26,9	27,0	27,0	27,1	27,0
t[s]	100,8	105,0	109,2	113,4	117,6	121,8	126,0	130,2	134,4	138,6	142,8	147,0
T <sub>max</sub> [°C]	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	27,0	27,0	26,5	26,9	26,9	26,9
t[s]	151,2	155,4	159,6	163,8	168,0	172,2	176,4	180,6	184,8	189,0	193,2	197,4
T <sub>max</sub> [°C]	27,0	27,0	27,1	27,0	27,1	27,0	27,1	27,1	27,0	27,1	27,0	27,1
t[s]	201,6	205,8	210,0	214,2	218,4	222,6	226,8	231,0	235,2	239,4	243,6	247,8
T <sub>max</sub> [°C]	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	26,9	27,0	27,1	27,0	27,1	27,0	27,1
t[s]	252,0	256,2	260,4	264,6	268,8	273,0	277,2	281,4				
T <sub>max</sub> [°C]	27,2	27,2	27,2	27,2	27,3	27,9	28,2	28,1				





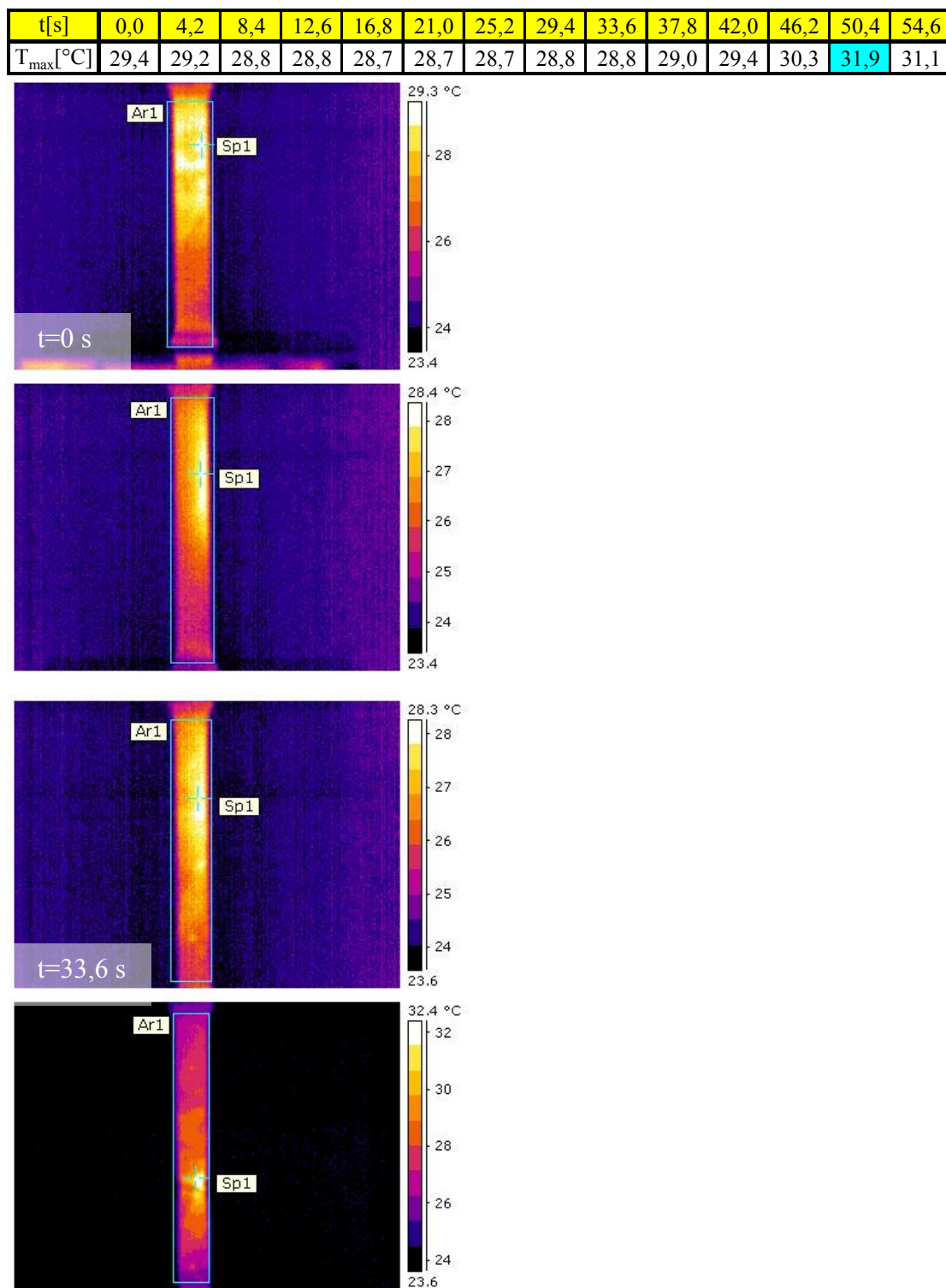
Obr. 7.4.1.1 Termogramy z měření



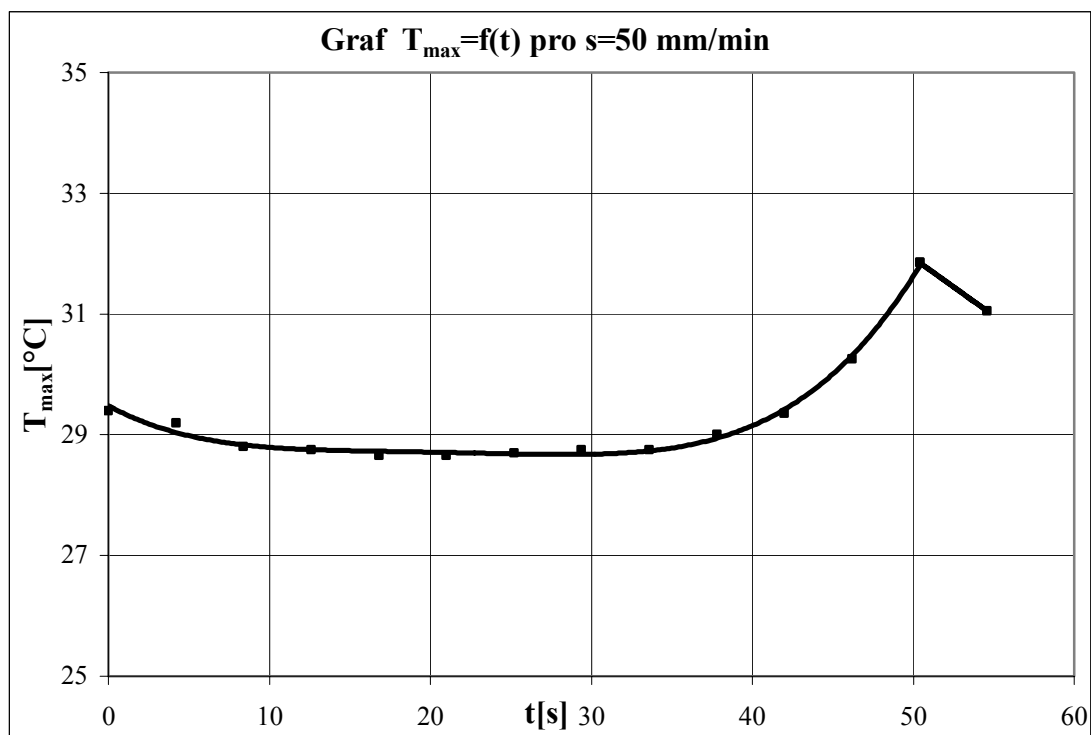
Obr. 7.4.1.2 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

## 7.4.2 Rychlost posuvu 50 mm/min

Tab. 7.4.2.1 Naměřené maximální teploty



Obr. 7.4.2.1 Termogramy z měření

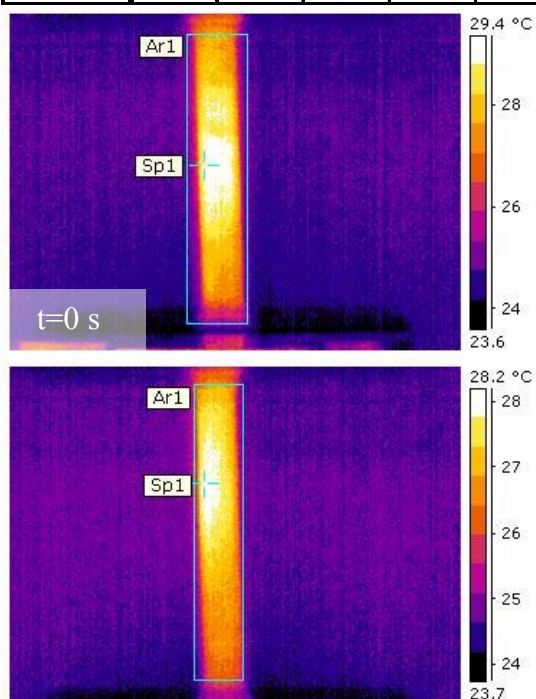


Obr. 7.4.2.2 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

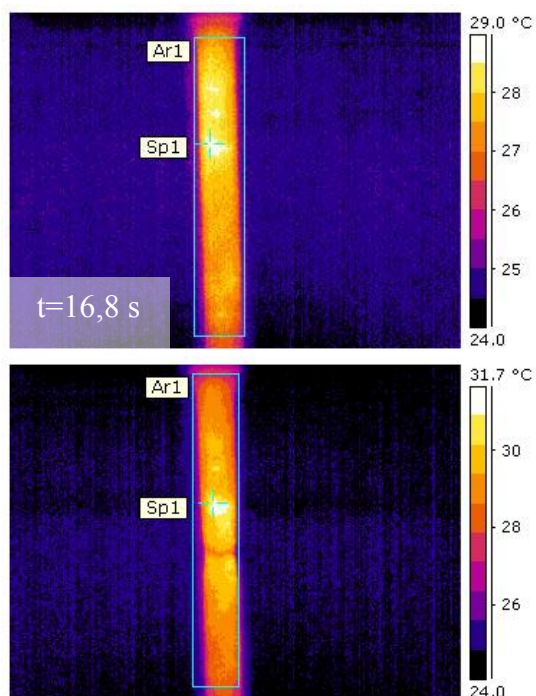
### 7.4.3 Rychlost posuvu 100mm/min

Tab. 7.4.3.1 Naměřené maximální teploty

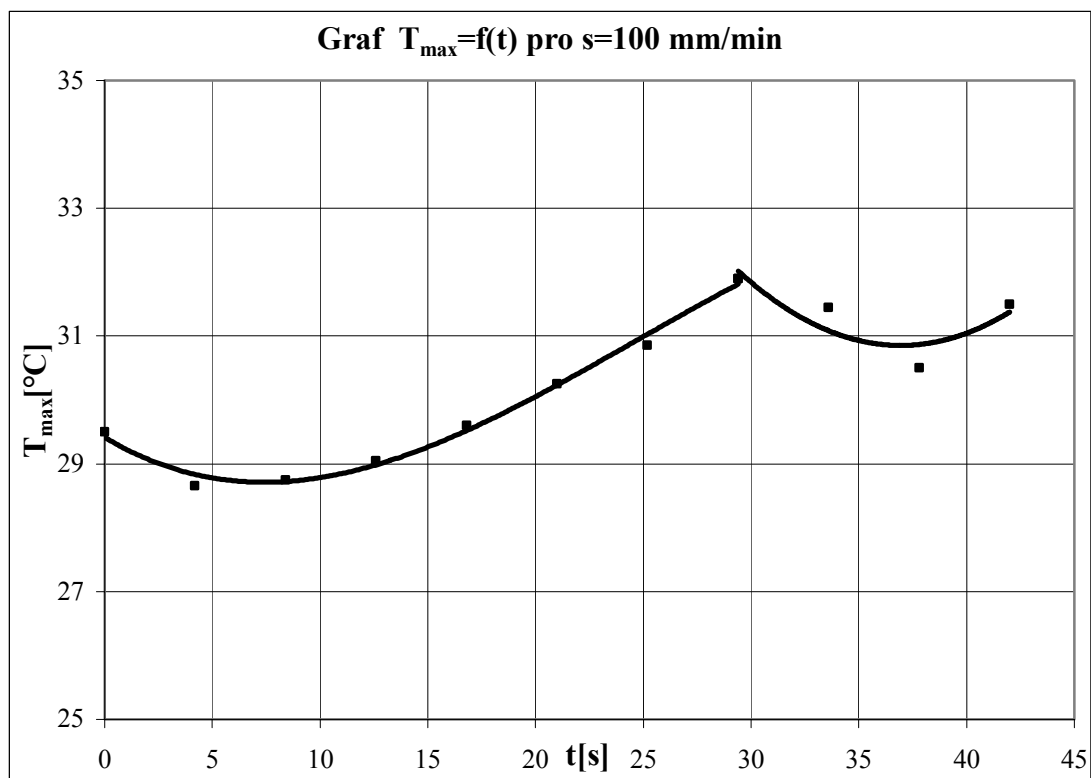
t[s]	0,0	4,2	8,4	12,6	16,8	21,0	25,2	29,4	33,6	37,8	42,0
$T_{\max}$ [°C]	29,5	28,7	28,8	29,1	29,6	30,3	30,9	31,9	31,5	30,5	31,5







Obr. 7.4.3.1 Termogramy z měření



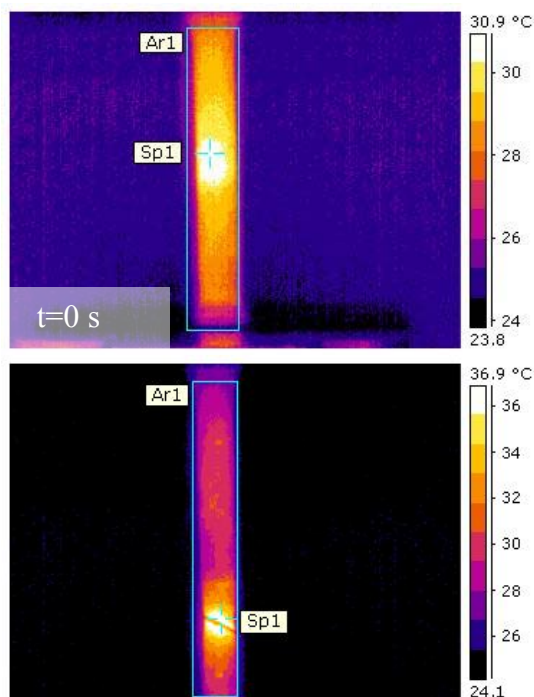
Obr. 7.4.3.2 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

## 7.4.4 Rychlost posuvu 600 mm/min

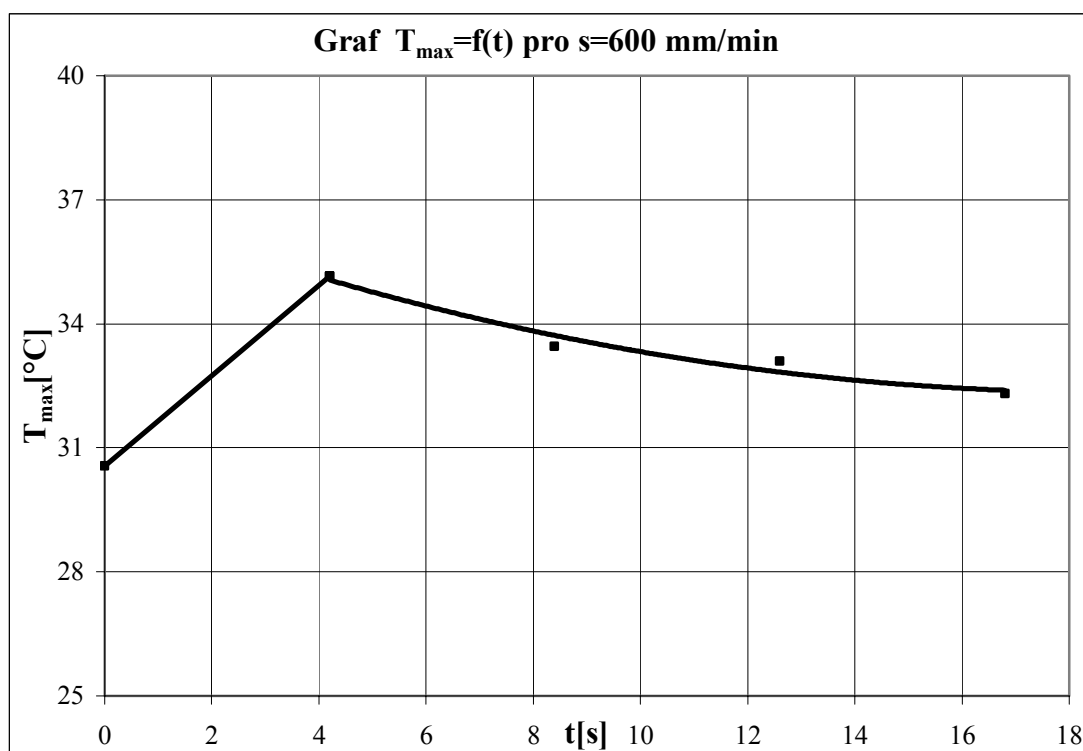
Tab. 7.4.4.1 Naměřené maximální teploty



t[s]	0,0	4,2	8,4	12,6	16,8
T <sub>max</sub> [°C]	30,6	35,2	33,5	33,1	32,3



Obr. 7.4.4.1 Termogramy z měření

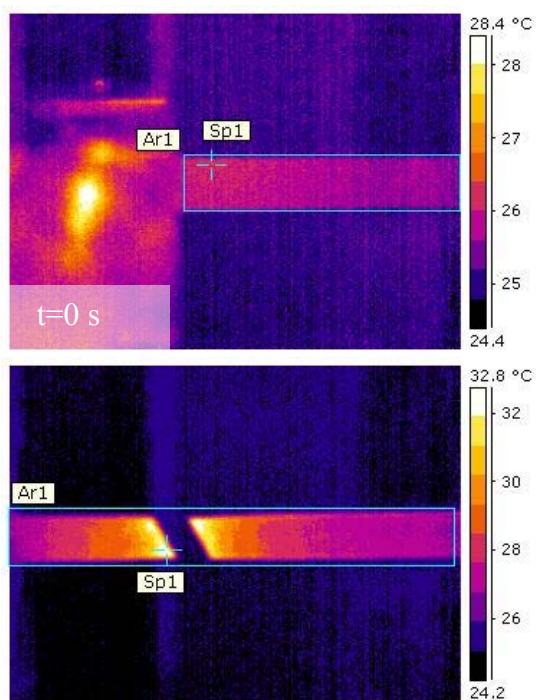


Obr. 7.4.4.2 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

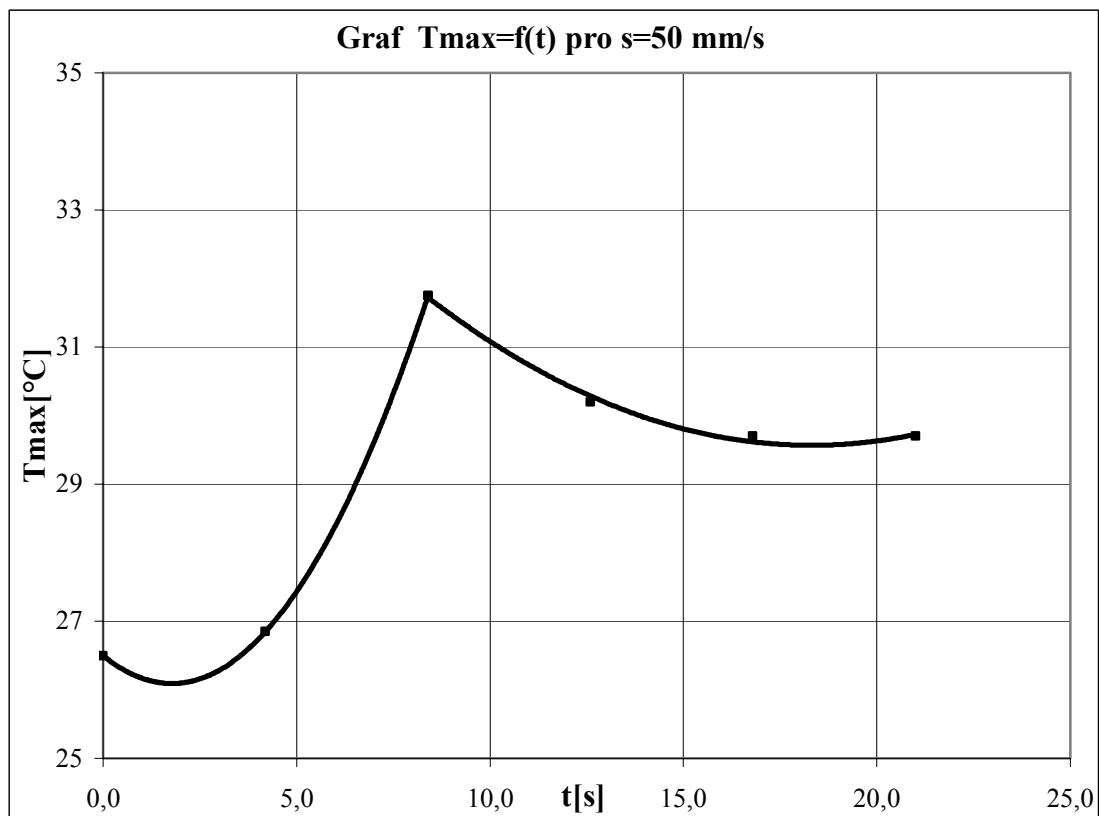
### 7.4.5 Rychlost posuvu 50 mm/s

Tab. 7.4.5.1 Naměřené maximální teploty

t[s]	0,0	4,2	8,4	12,6	16,8	21,0
T <sub>max</sub> [°C]	26,5	26,9	31,8	30,2	29,7	29,7



Obr. 7.4.5.1 Termogramy z měření

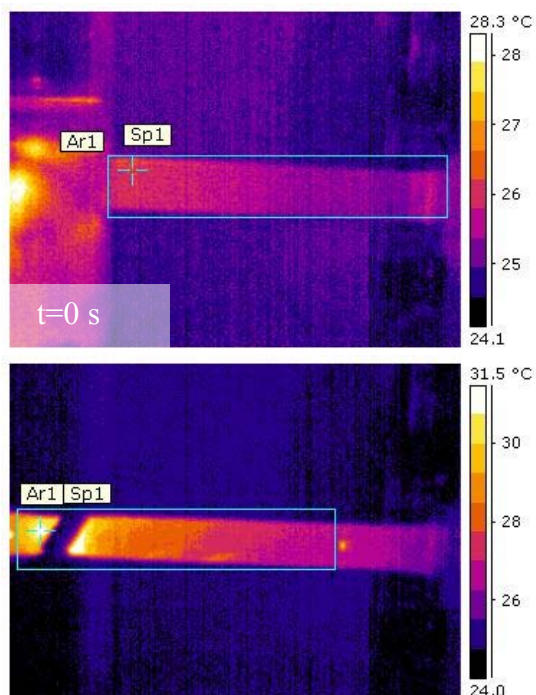


Obr. 7.4.5.2 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

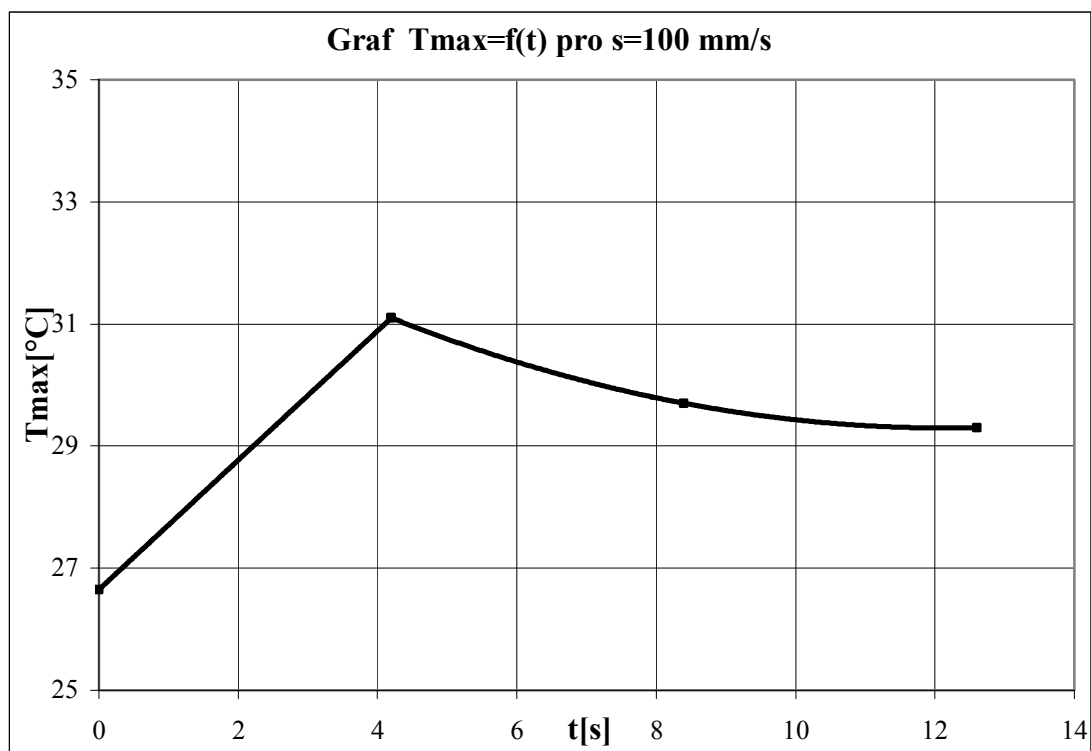
### 7.4.6 Rychlost posuvu 100 mm/s

Tab. 7.4.6.1 Naměřené maximální teploty

t[s]	0,0	4,2	8,4	12,6
T <sub>max</sub> [°C]	26,7	31,1	29,7	29,3



Obr. 7.4.6.1 Termogramy z měření

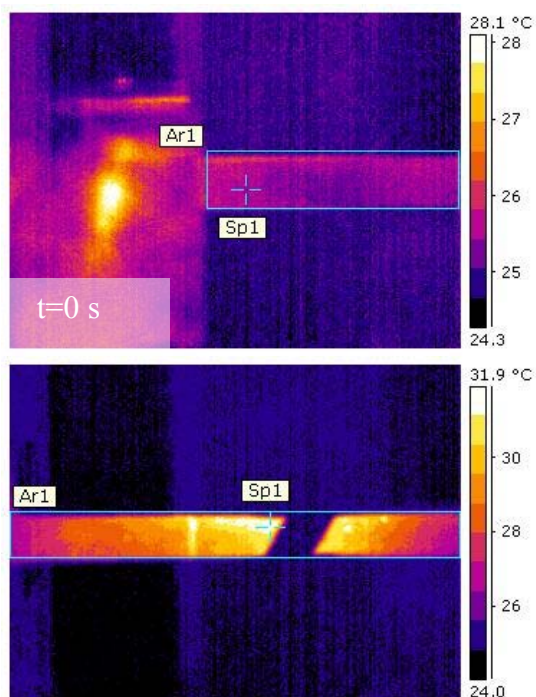


Obr. 7.4.6.2 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

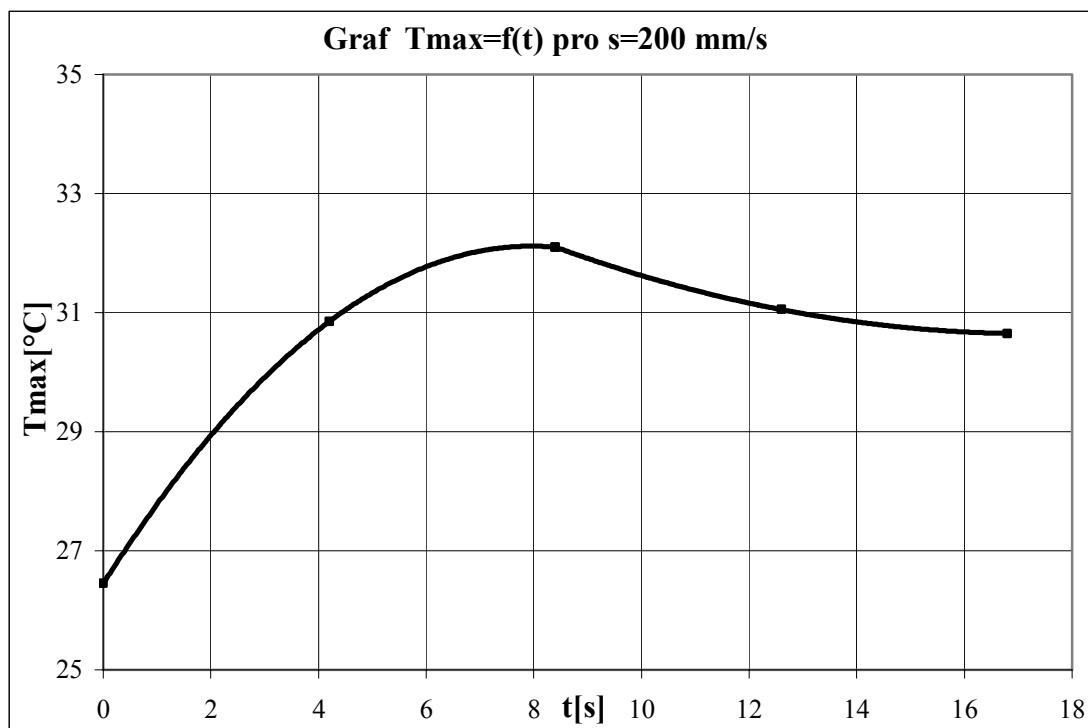
### 7.4.7 Rychlost posuvu 200 mm/s

Tab. 7.4.7.1 Naměřené maximální teploty

t[s]	0,0	4,2	8,4	12,6	16,8
$T_{\max}$ [°C]	26,5	30,9	32,1	31,1	30,7



Obr. 7.4.7.1 Termogramy z měření

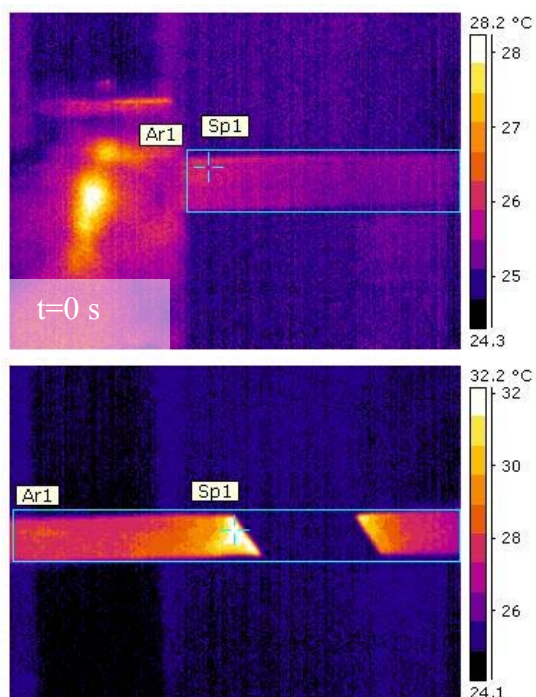


Obr. 7.4.7.2 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

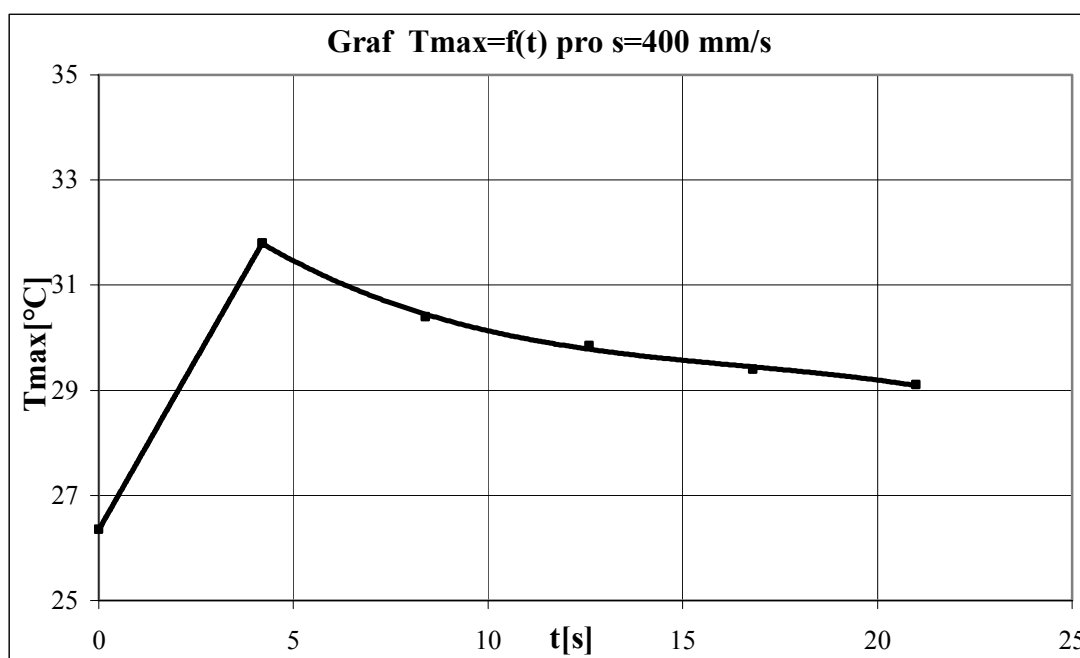
## 7.4.8 Rychlost posuvu 400 mm/s

Tab. 7.4.8.1 Naměřené maximální teploty

t[s]	0,0	4,2	8,4	12,6	16,8	21,0
$T_{\max}$ [°C]	26,4	31,8	30,4	29,9	29,4	29,1



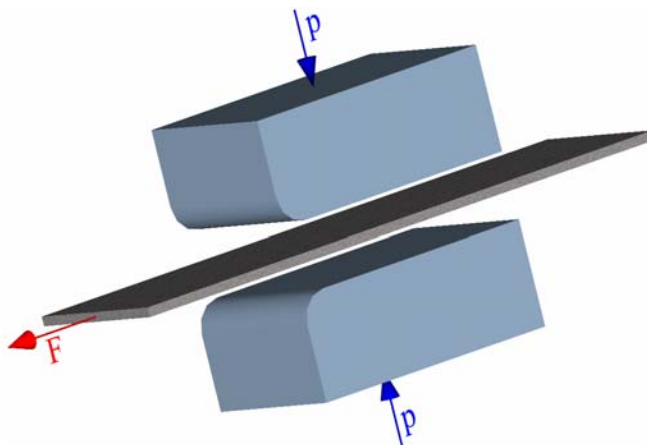
Obr. 7.4.8.1 Termogramy z měření



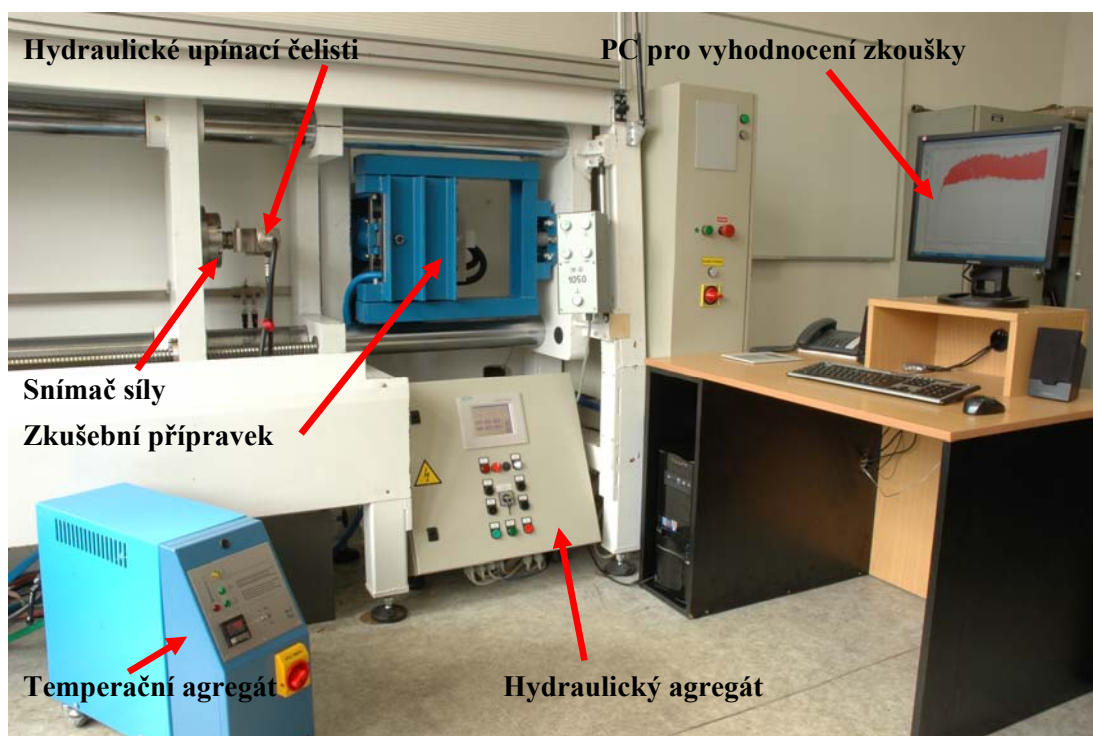
Obr. 7.4.8.2 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

## 7.5 Měření tribologie Termokamerou Flir P65 Pal na zařízení Sokol 400

Tribologické zkoušky byly prováděny s cílem zaměřit se na teplotu vznikající ve výtažcích vlivem tření, a to za různých tlaků mezi čelistmi a na různých drahách. Měřené rychlosti posuvů byly zvoleny s ohledem na důvody popsané již v předchozí kapitole 7.4 1 mm/s, 10 mm/s, 50 mm/s, 100 mm/s, 200 mm/s a 400 mm/s. Tlaky mezi čelistmi pak byly zvoleny 3MPa, 5MPa a 7MPa. Dráha  $l$  označuje vzdálenost, na které byl pás vytahován z čelistí. Jako prací olej, který je při této zkoušce nutno potříť na pás plechu, byl zvolen Anticorit PL 3802-39LV a to v konstantní vrstvě  $1,5 \text{ g/m}^2 \pm 0,2 \text{ g/m}^2$ .



Obr. 7.5.1 Princip přímého tribologického testu



Obr. 7.5.2 Tribologická zkušebna Sokol 400

Tab. 7.5.1 Podmínky při měření

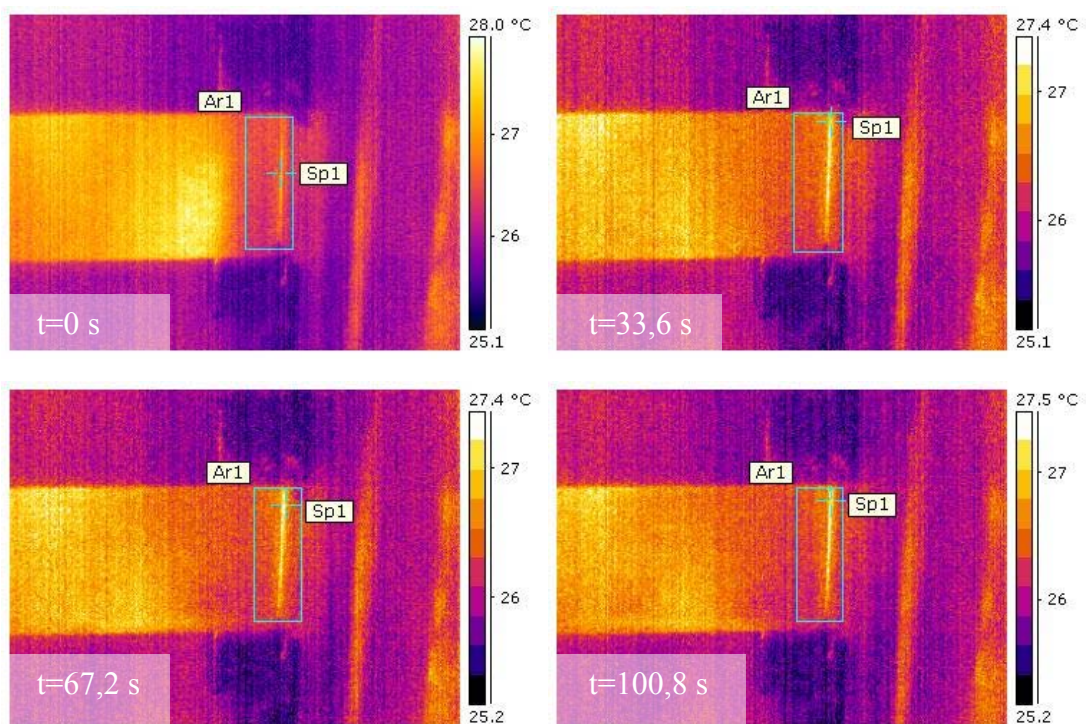
Parametry objektu		
Emisivita	0,75	[-]
Odražená teplota	22	[°C]
Atmosferická teplota	23	[°C]
Relativní vlhkost	55	[%]
Vzdálenost	0,5	[m]

## 7.5.1 Rychlost posuvu 1 mm/s na dráze 100 mm

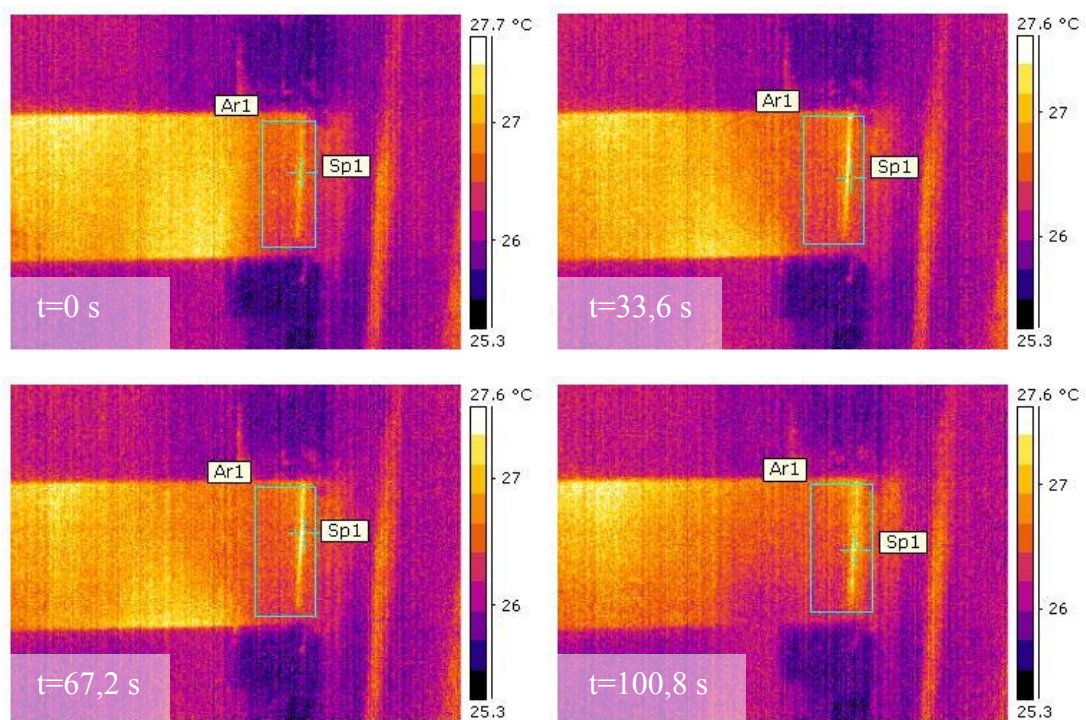
Tab. 7.5.1.1 Naměřené maximální teploty

t[s]		0,0	4,2	8,4	12,6	16,8	21,0	25,2	29,4	33,6	37,8	42,0	46,2	50,4
T <sub>max</sub> [°C]	3MPa	27,0	27,1	27,2	27,4	27,5	27,5	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,5
	5MPa	27,6	27,6	27,8	27,8	27,7	27,8	27,9	27,9	27,8	27,7	27,6	27,8	27,8
	7MPa	27,5	27,6	27,7	27,8	27,7	27,7	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8
t[s]		54,6	58,8	63,0	67,2	71,4	75,6	79,8	84,0	88,2	92,4	96,6	100,8	
T <sub>max</sub> [°C]	3MPa	27,6	27,6	27,5	27,6	27,6	27,5	27,5	27,6	27,7	27,7	27,7	28,0	
	5MPa	27,8	27,7	27,7	27,7	27,9	27,8	27,9	27,8	27,8	27,9	27,9	27,7	
	7MPa	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,9	27,8	27,9	27,9	27,9	27,8	28,0	



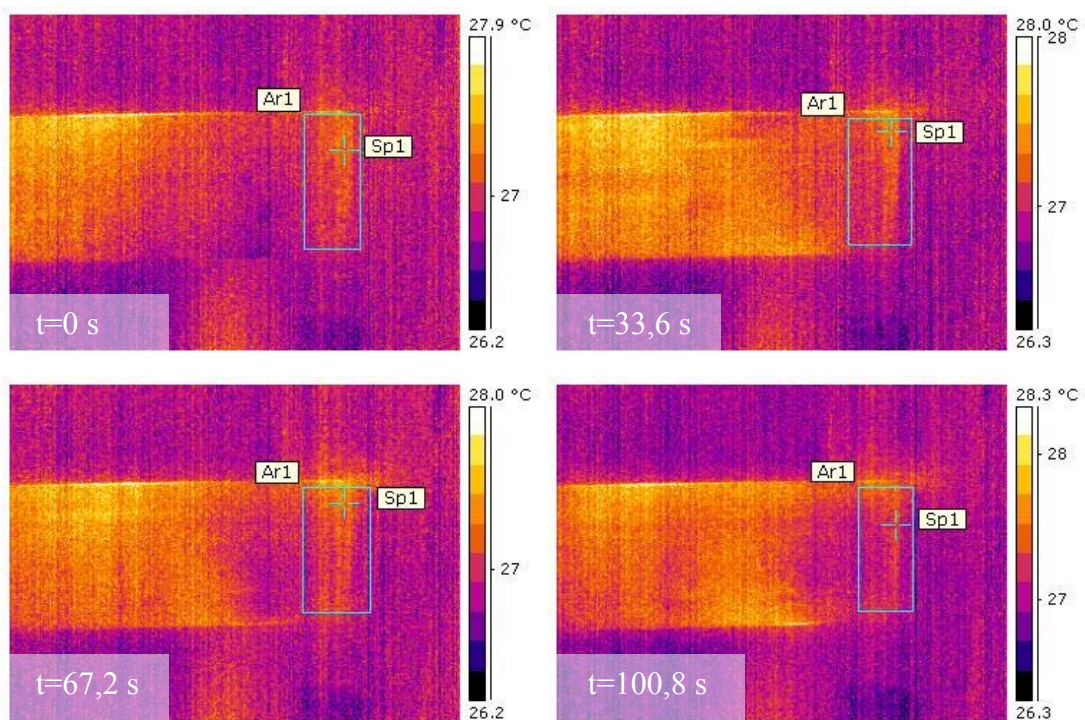


Obr. 7.5.1.1 Termogramy z měření při tlaku 3 MPa

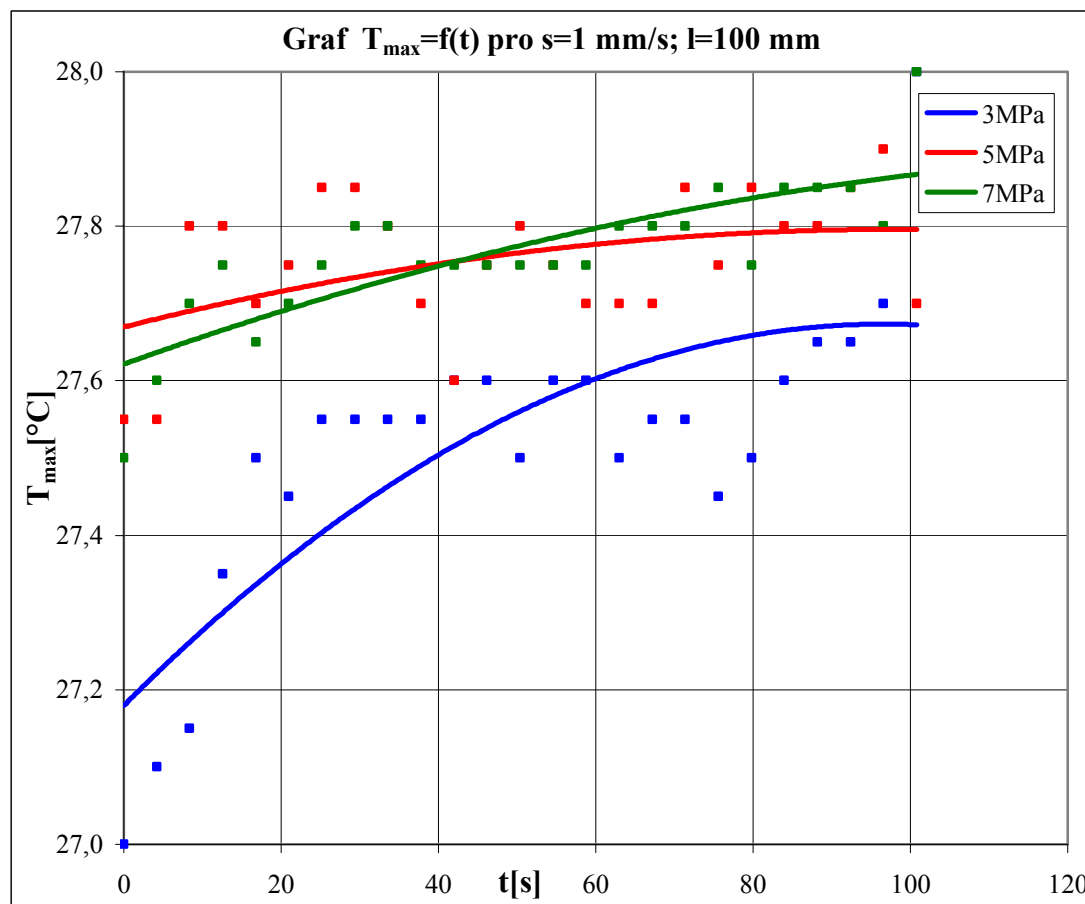


Obr. 7.5.1.2 Termogramy z měření při tlaku 5 MPa





Obr. 7.5.1.3 Termogramy z měření při tlaku 7 MPa

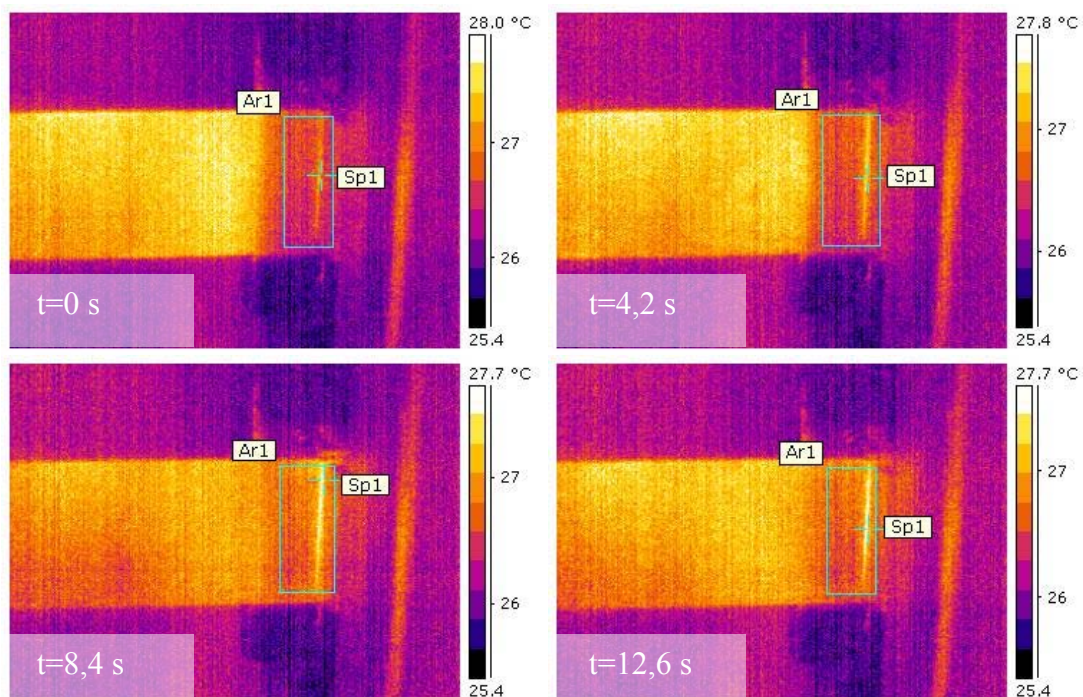


Obr. 7.6.1.4 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

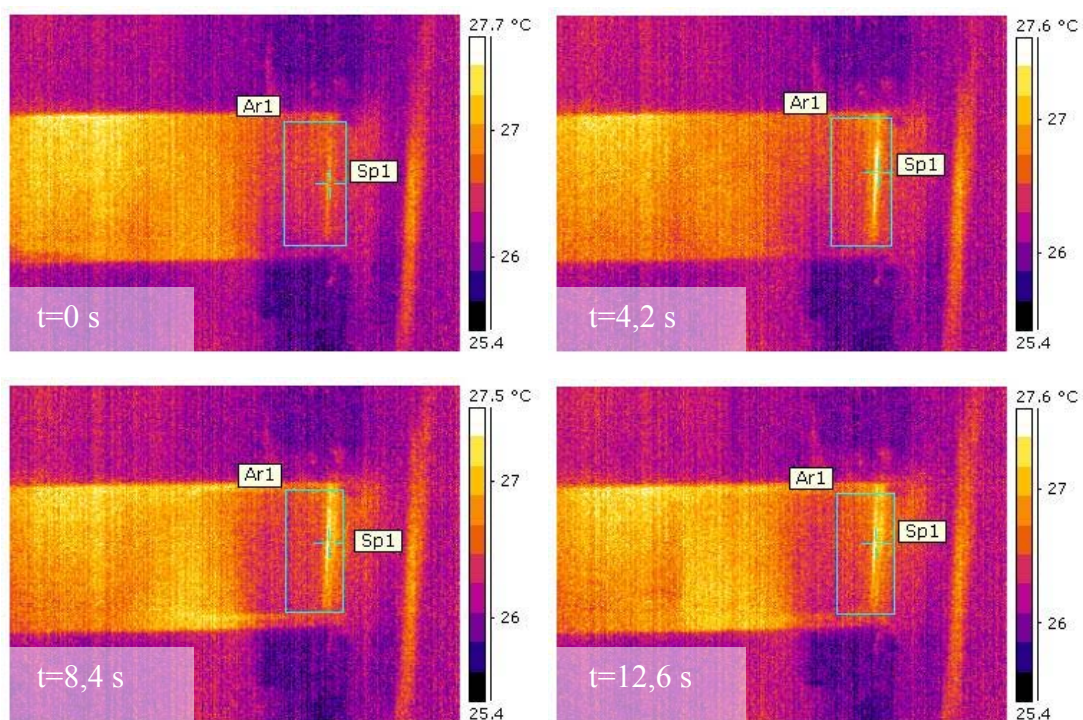
## 7.5.2 Rychlost posuvu 10 mm/s na dráze 100 mm

Tab. 7.5.2.1 Naměřené maximální teploty

t[s]		0,0	4,2	8,4	12,6	16,8
T <sub>max</sub> [°C]	3MPa	27,5	27,9	27,9	27,8	-
	5MPa	27,5	27,9	27,9	27,8	28,0
	7MPa	27,9	28,1	28,4	28,4	28,3

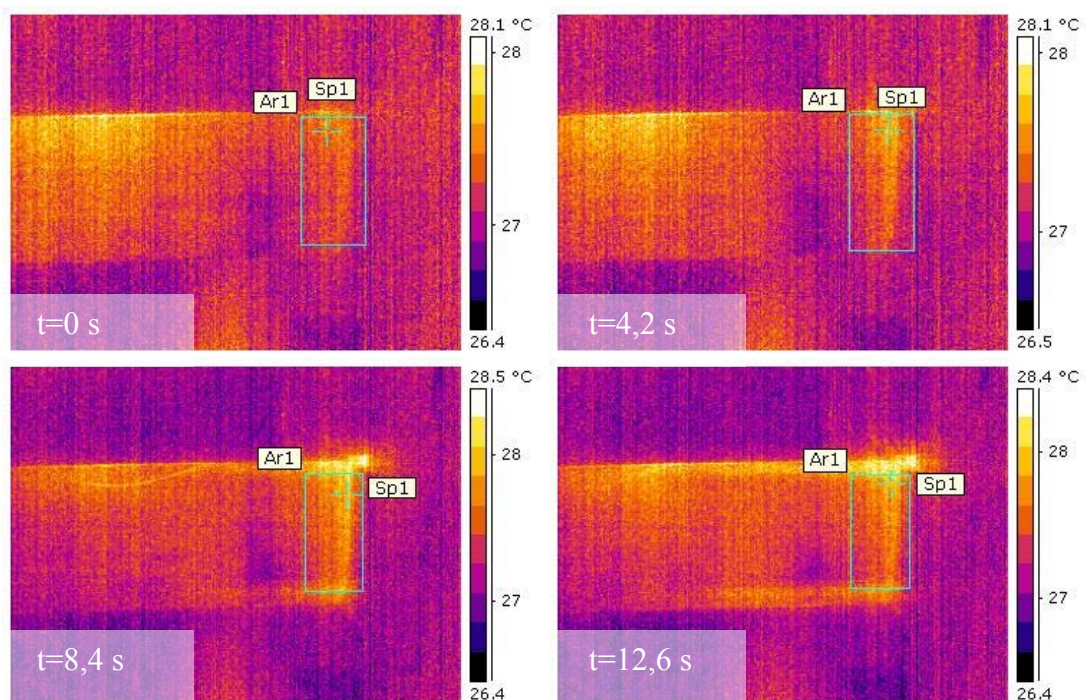


Obr. 7.5.2.1 Termogramy z měření při tlaku 3 MPa

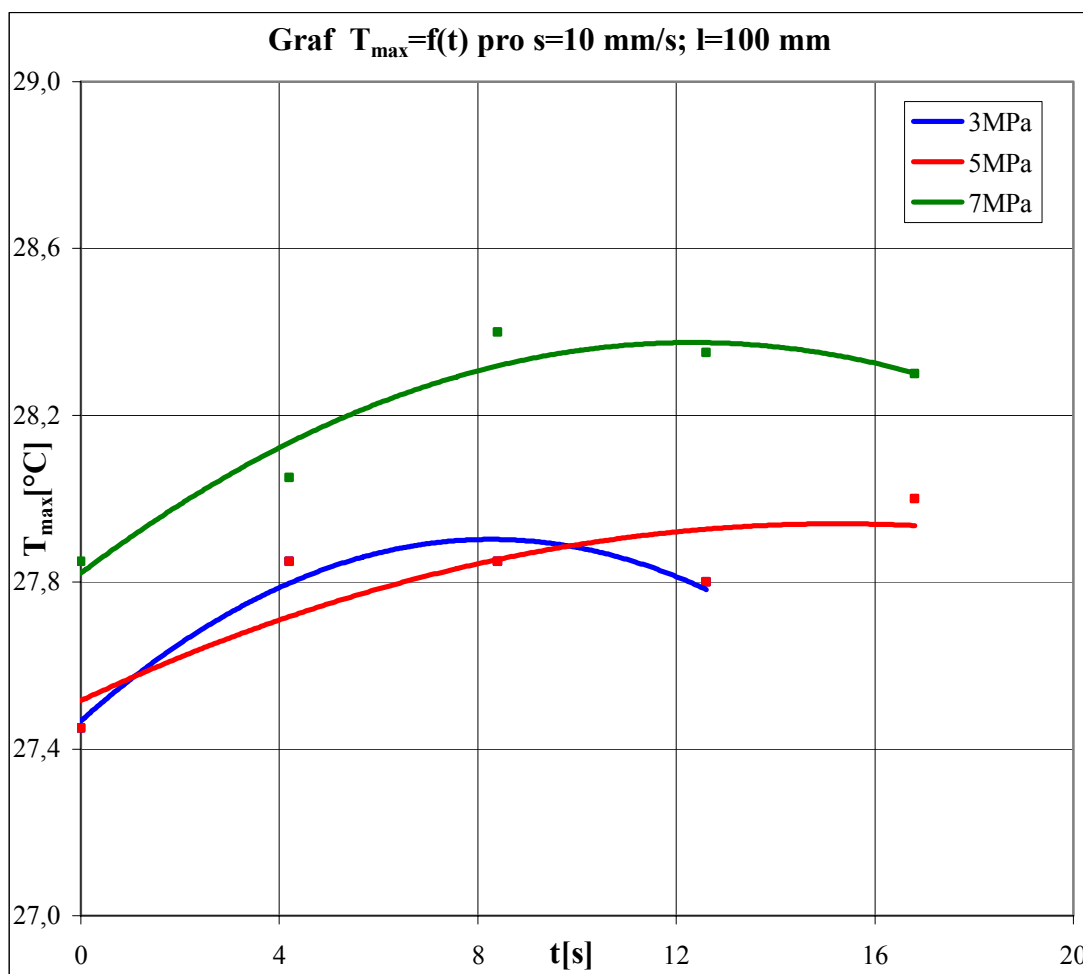


Obr. 7.5.2.2 Termogramy z měření při tlaku 5 MPa





Obr. 7.5.2.3 Termogramy z měření při tlaku 7 MPa

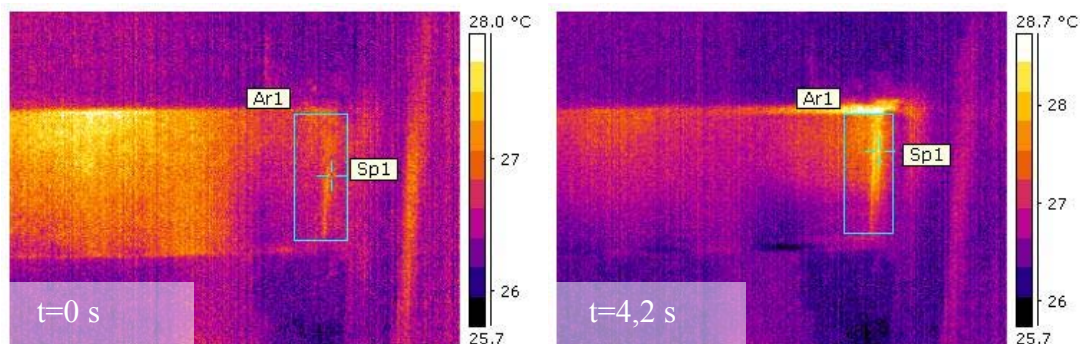


Obr. 7.5.2.4 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

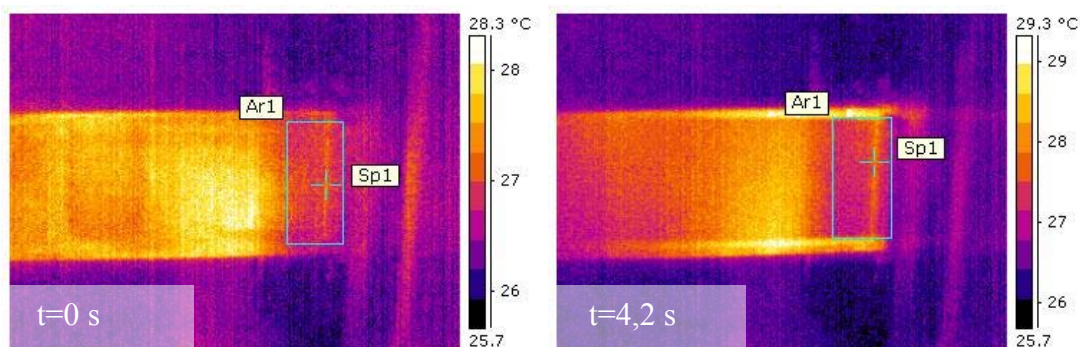
### 7.5.3 Rychlost posuvu 50 mm/s na dráze 100 mm

Tab. 7.5.3.1 Naměřené maximální teploty

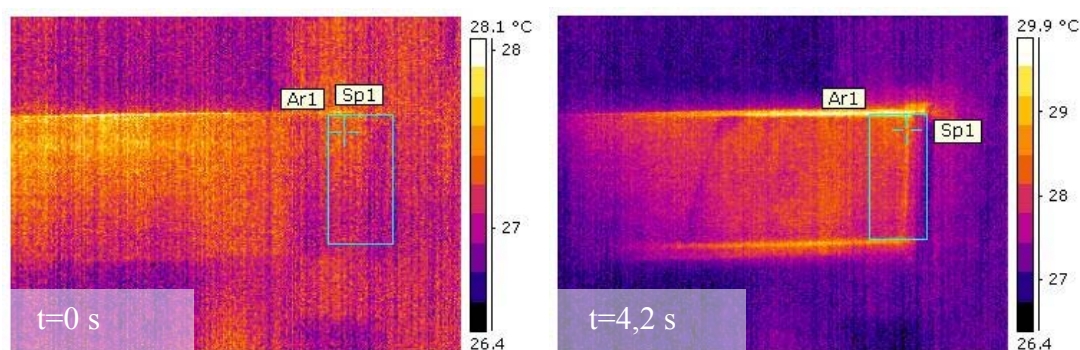
t[s]		0,0	4,2	8,4	12,6	16,8
$T_{\max}$ [°C]	3MPa	27,5	28,6	28,4	27,7	-
	5MPa	27,7	28,2	28,3	28,2	-
	7MPa	27,9	29,1	28,5	28,4	28,0



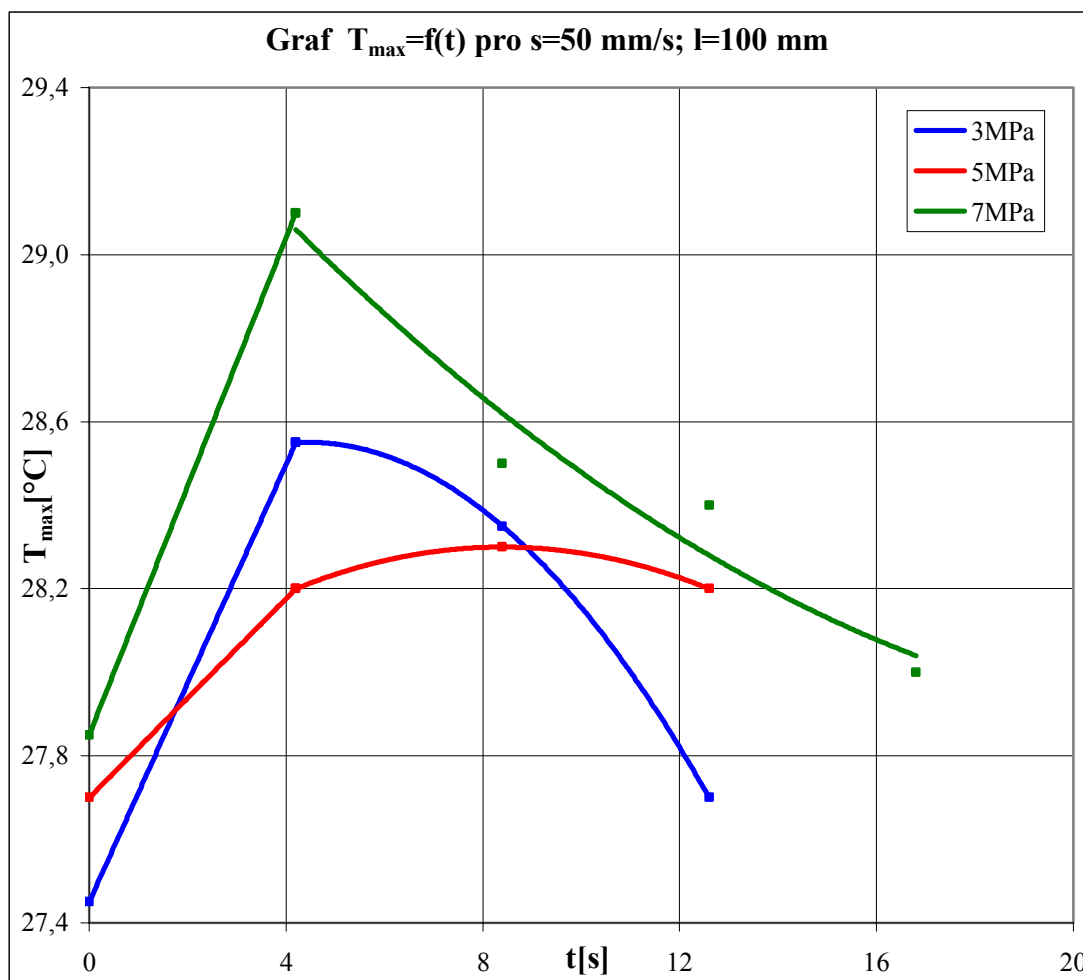
Obr. 7.5.3.1 Termogramy z měření při tlaku 3 MPa



Obr. 7.5.3.2 Termogramy z měření při tlaku 5 MPa



Obr. 7.5.3.3 Termogramy z měření při tlaku 7 MPa

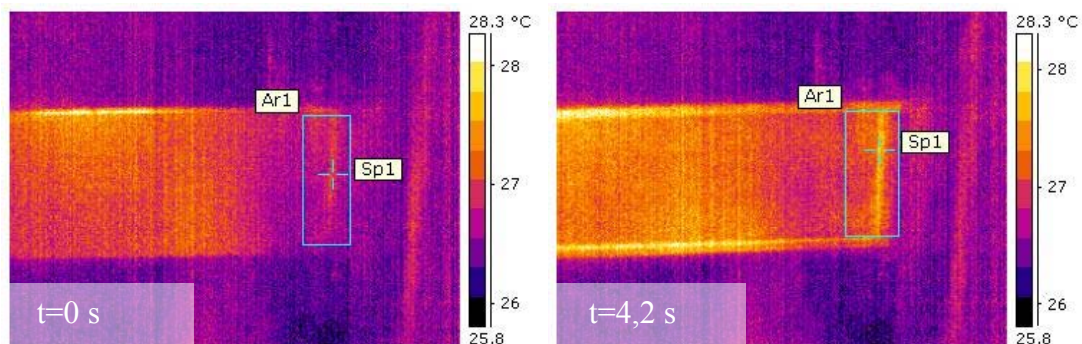


Obr. 7.5.3.4 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

### 7.5.4 Rychlost posuvu 100 mm/s na dráze 200 mm

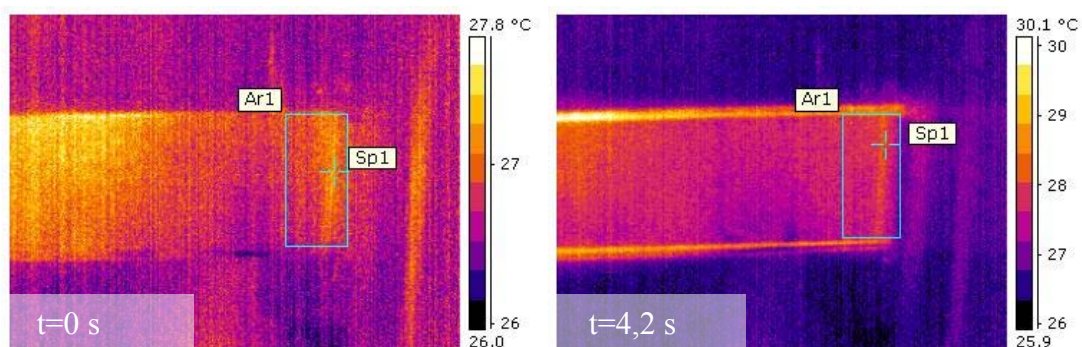
Tab. 7.5.4.1 Naměřené maximální teploty

t[s]		0,0	4,2	8,4	12,6	16,8
$T_{\max}$ [°C]	3MPa	27,6	28,0	27,9	27,9	27,8
	5MPa	27,7	28,6	28,3	28,1	-
	7MPa	27,9	29,9	28,9	28,4	28,6

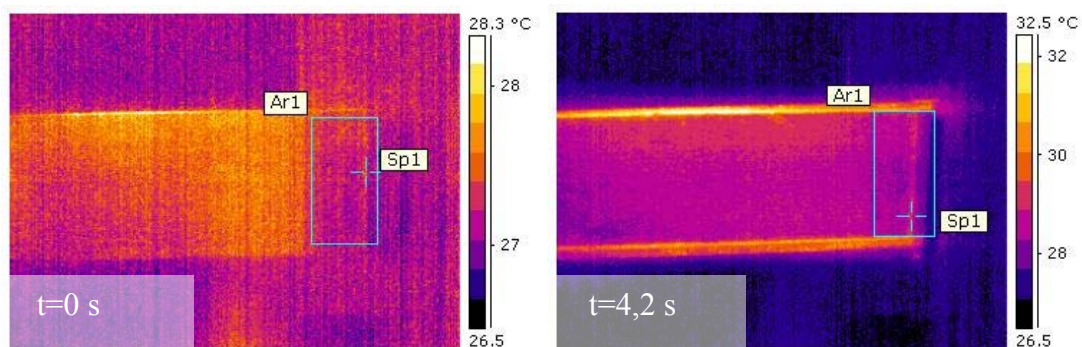


Obr. 7.5.4.1 Termogramy z měření při tlaku 3 MPa

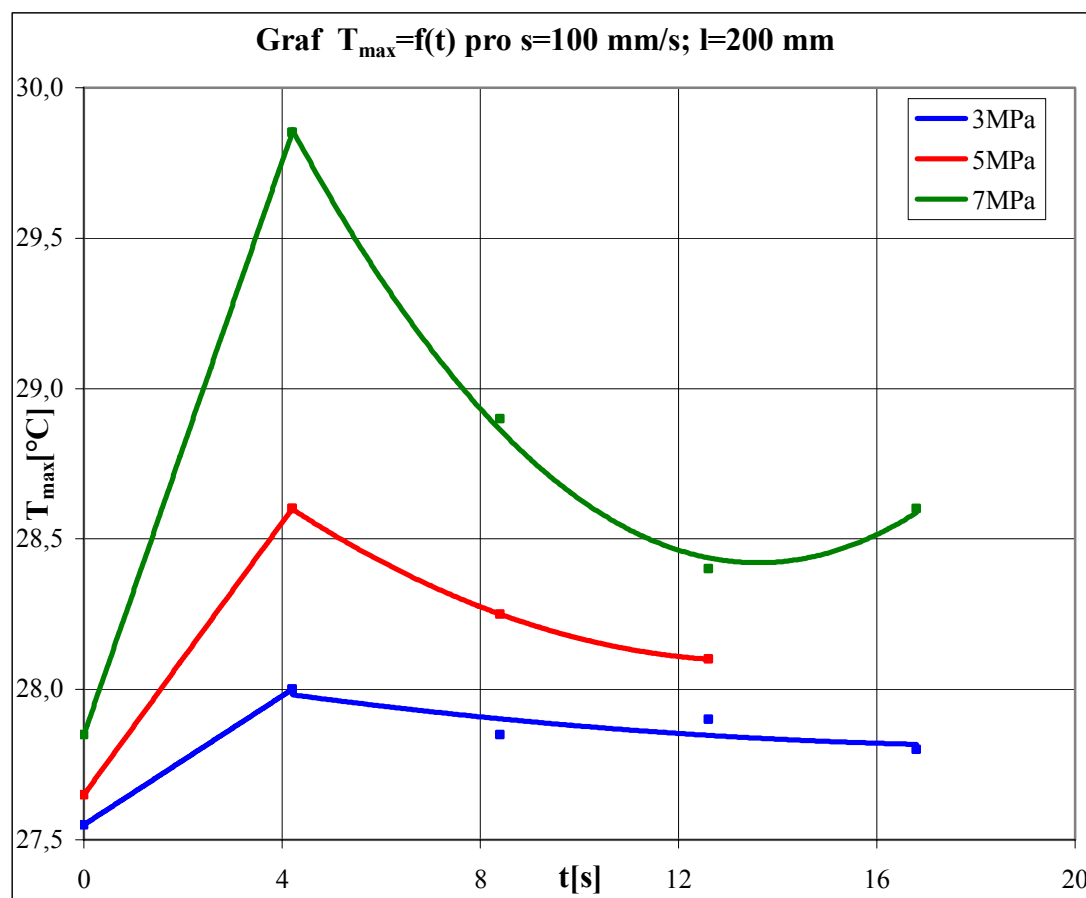




Obr. 7.5.4.2 Termogramy z měření při tlaku 5 MPa



Obr. 7.5.4.3 Termogramy z měření při tlaku 7 MPa

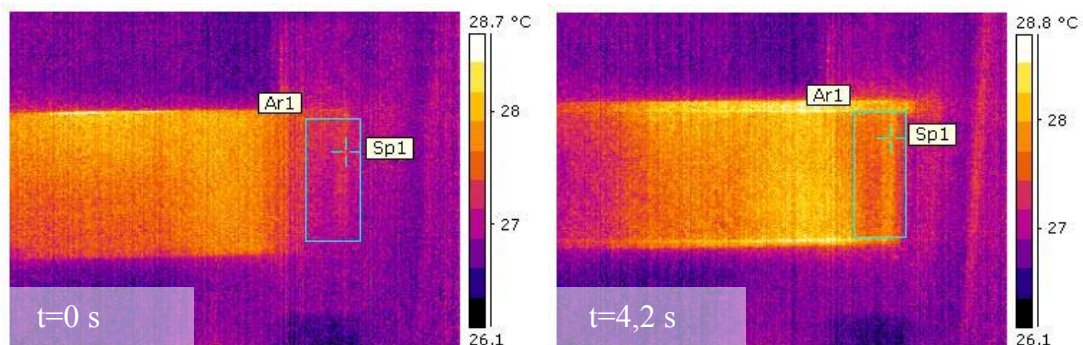


Obr. 7.5.4.4 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

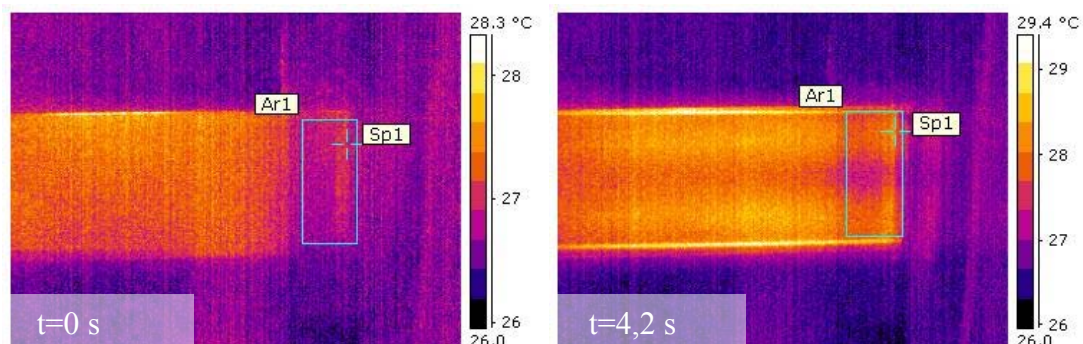
### 7.5.5 Rychlost posuvu 200 mm/s na dráze 300 mm

Tab. 7.5.5.1 Naměřené maximální teploty

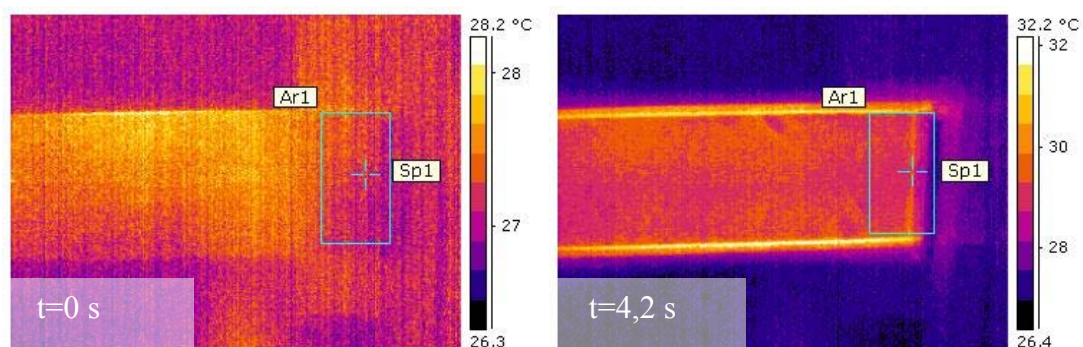
t[s]		0,0	4,2	8,4	12,6
$T_{\max}$ [°C]	3MPa	27,9	28,5	28,4	28,2
	5MPa	27,6	28,8	28,7	28,3
	7MPa	27,9	30,3	29,2	28,9



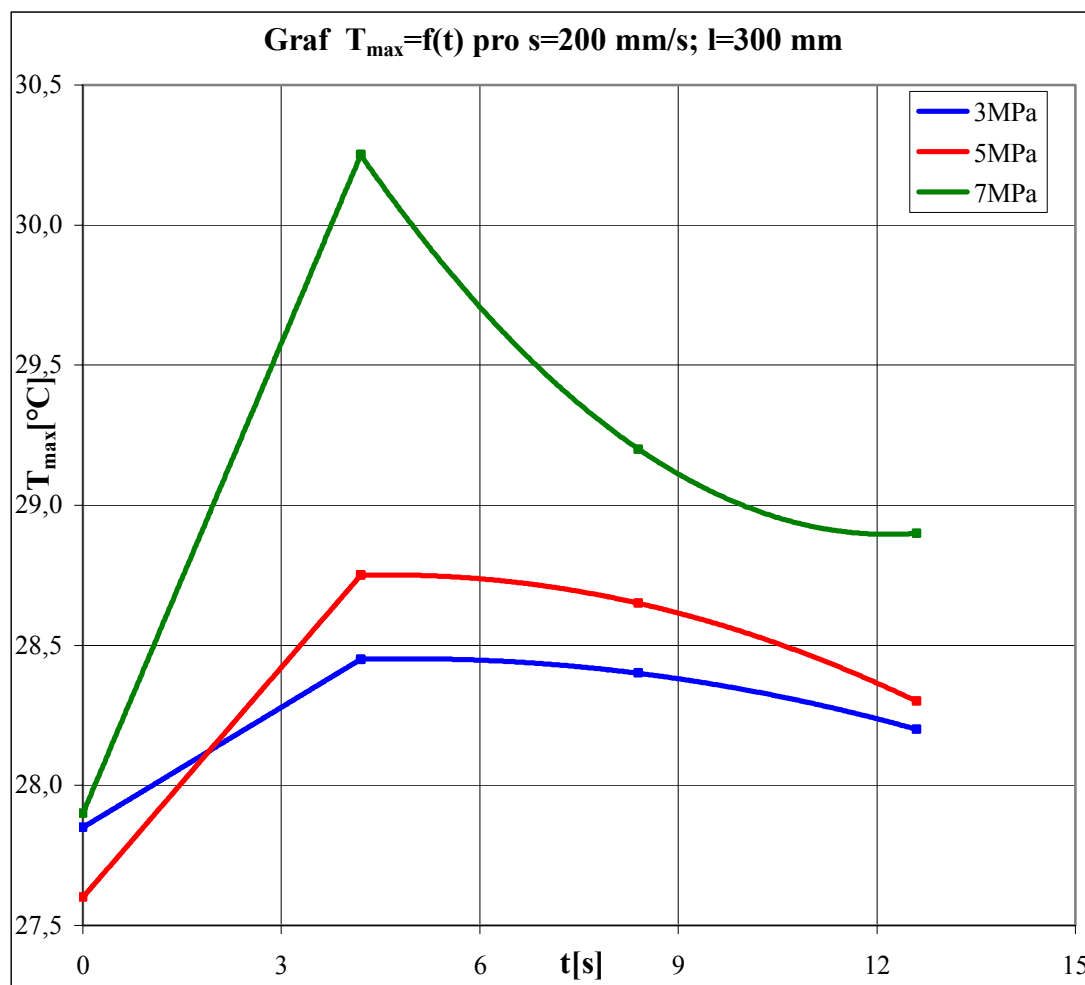
Obr. 7.5.5.1 Termogramy z měření při tlaku 3 MPa



Obr. 7.5.5.2 Termogramy z měření při tlaku 5 MPa



Obr. 7.5.5.3 Termogramy z měření při tlaku 7 MPa

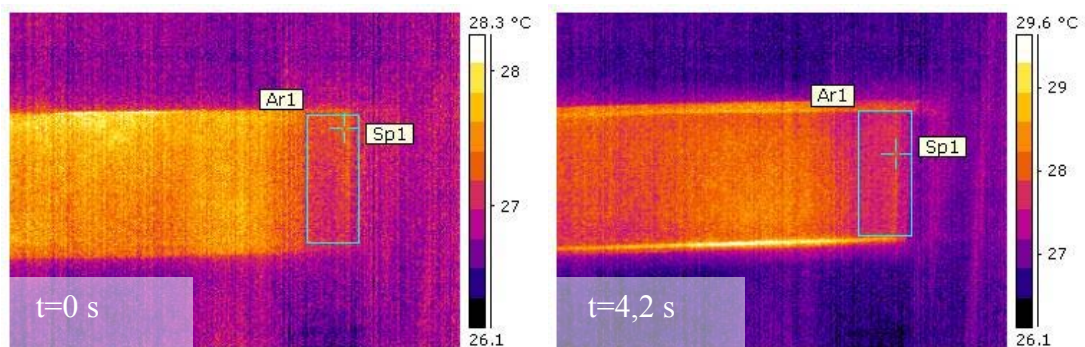


Obr. 7.5.5.4 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

### 7.5.6 Rychlost posuvu 400 mm/s na dráze 300 mm

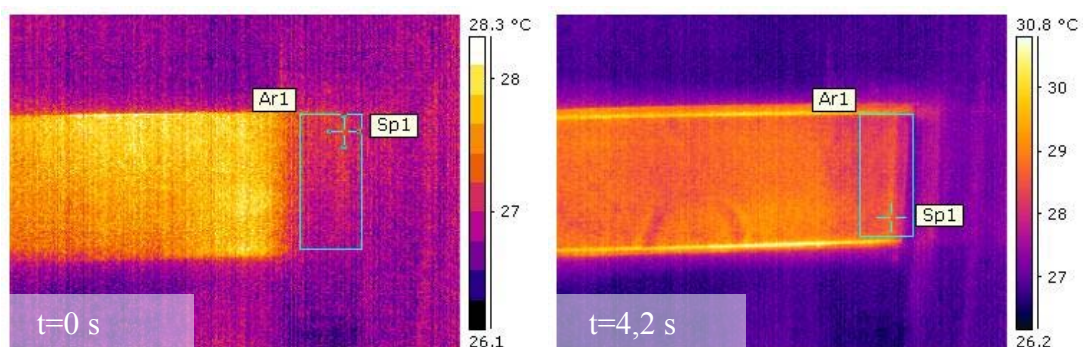
Tab. 7.5.6.1 Naměřené maximální teploty

t[s]		0,0	4,2	8,4	12,6
$T_{\max}$ [°C]	3MPa	27,6	28,4	28,1	27,9
	5MPa	27,7	29,4	28,6	28,4
	7MPa	28,0	30,4	29,6	29,1

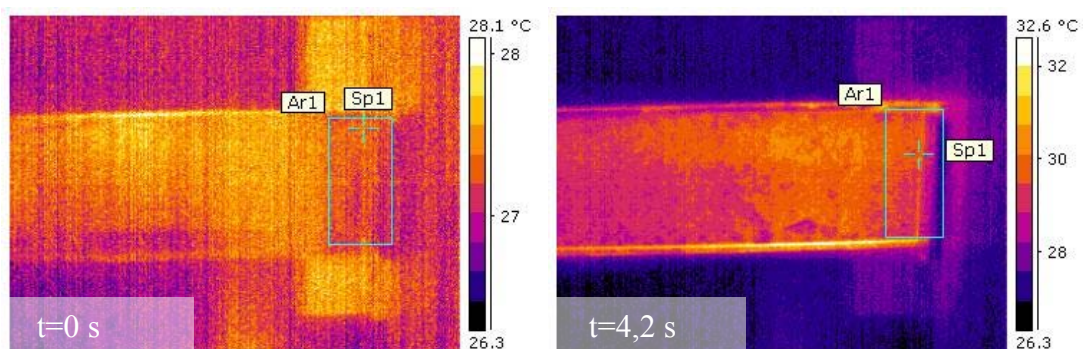


Obr. 7.5.6.1 Termogramy z měření při tlaku 3 MPa

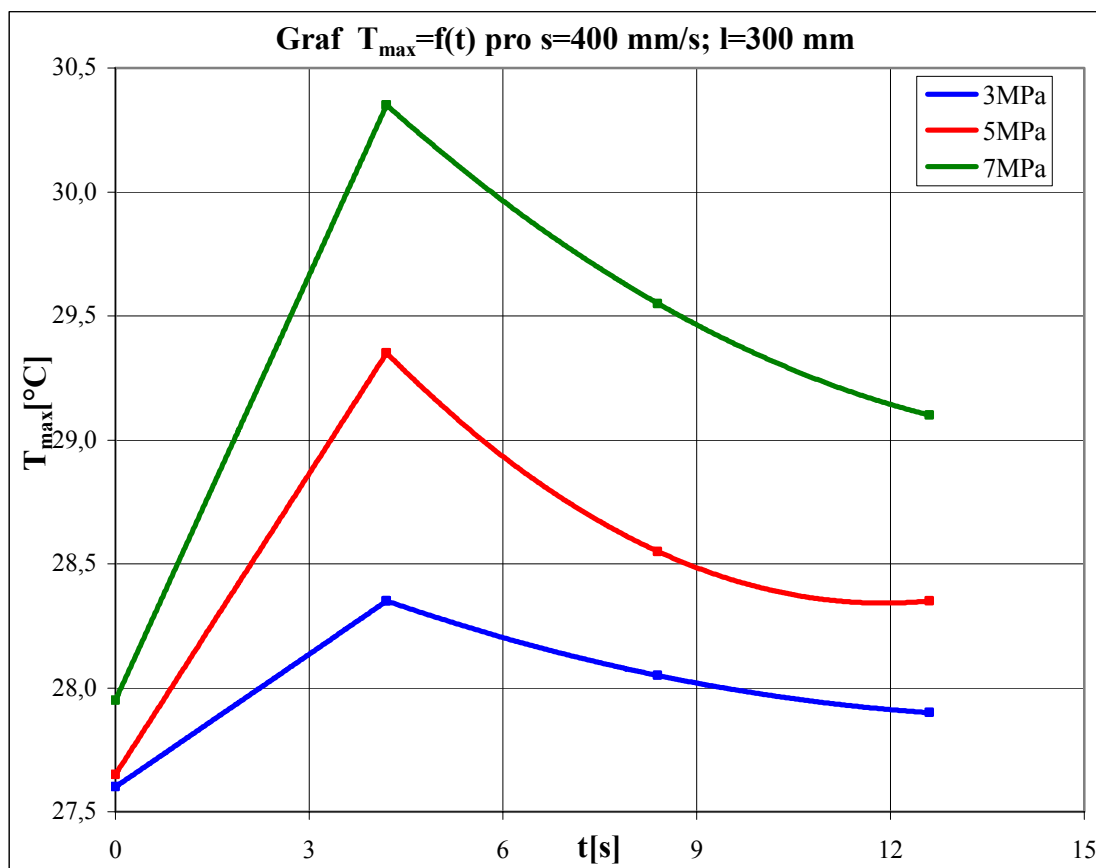




Obr. 7.5.6.2 Termogramy z měření při tlaku 5 MPa



Obr. 7.5.6.3 Termogramy z měření při tlaku 7 MPa



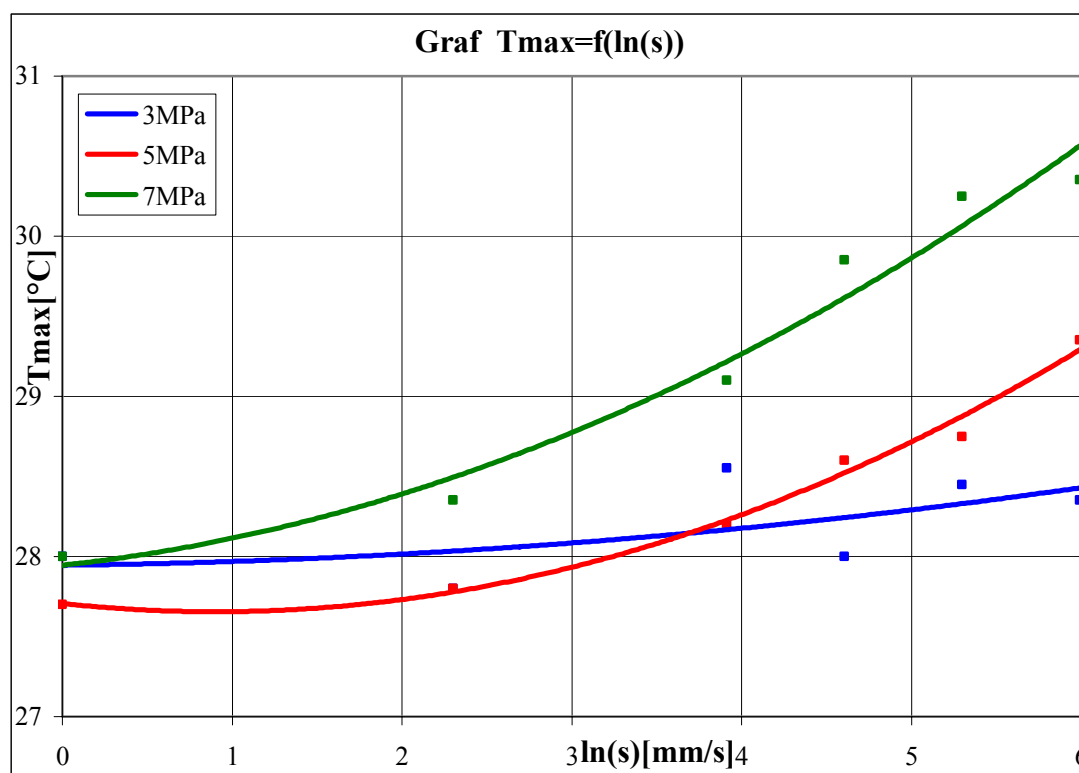
Obr. 7.5.6.4 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

### 7.5.7 Souhrnná závislost z tribologické zkoušky

Z předešlých tribologických zkoušek byly vybrány ty maximální teploty, které odpovídaly okamžiku ukončení zkoušky. Tyto teploty byly vztaženy na logaritmickou rychlost posuvu, při které byly naměřeny, viz. závislost Obr. 7.5.7.1.

Tab. 7.5.7.1 Naměřené maximální teploty pro dané rychlosti posuvů

s[mm/s]		1	10	50	100	200	400
p[MPa]	3	28,0	27,8	28,6	28,0	28,5	28,4
	5	27,7	27,8	28,2	28,6	28,8	29,4
	7	28,0	28,4	29,1	29,9	30,3	30,4



Obr. 7.5.7.1 Graf závislosti maximální teploty na logaritmu rychlosti posuvu

### 7.6 Měření tahové zkoušky termokamerou Flir P65 Pal s olejovou vrstvou

Předchozí nepříliš přesvědčivé výsledky z tahových zkoušek nás přinutily natřít povrch vzorku látkou, která má vyšší emisivitu a zároveň není tak náchylná na odraženou teplotu. Jedná se tedy o metodu popsanou v kapitole 3.3.3, případ 4), avšak nátěr nebyl proveden černou matnou barvou, ale pracím olejem Anticorit PL

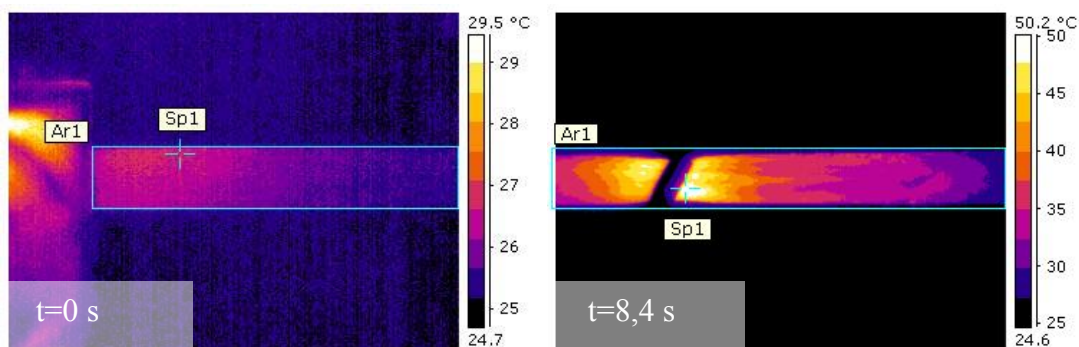
3802-39LV ve vrstvě  $1,5 \text{ g/m}^2 \pm 0,2 \text{ g/m}^2$  obdobně jako u tribologické zkoušky. Tato vrstva pracího oleje má dle tabulek termokamery emisivitu 0,82.

Tab. 7.6.1 Podmínky při měření

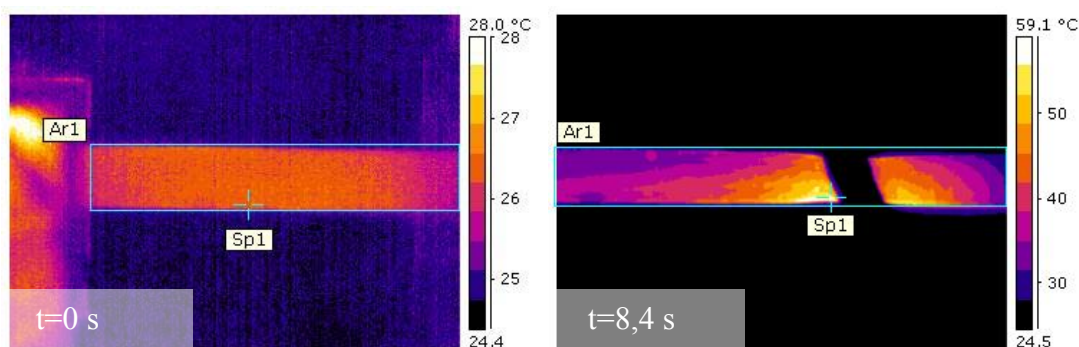
Parametry objektu		
Emisivita	0,82	[-]
Odražená teplota	22	[°C]
Atmosferická teplota	23	[°C]
Relativní vlhkost	55	[%]
Vzdálenost	0,5	[m]

Tab. 7.6.2 Naměřené maximální teploty

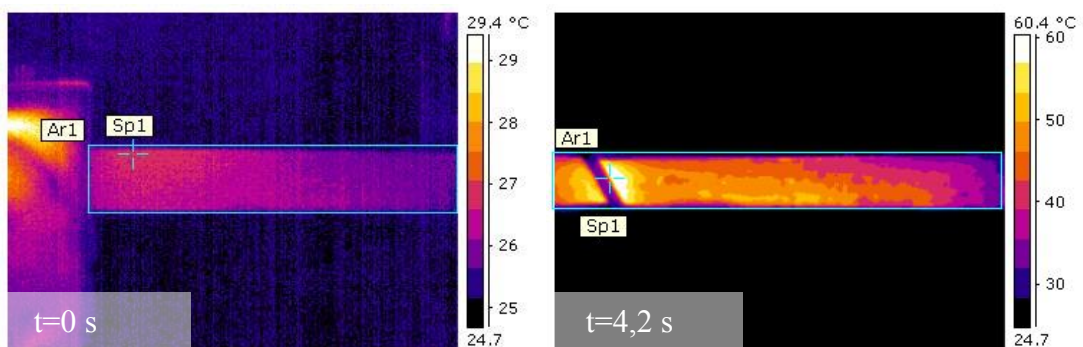
t[s]		0,0	4,2	8,4	12,6
$T_{\max}$ [°C]	5mm/s	27,1	31,8	50,5	44,3
	10mm/s	26,8	40,9	59,8	-
	50mm/s	27,2	60,8	51,7	49,5
	100mm/s	27,1	57,8	46,1	-
	200mm/s	27,4	51,1	44,1	42
	400mm/s	27,4	65,6	55,5	51,6



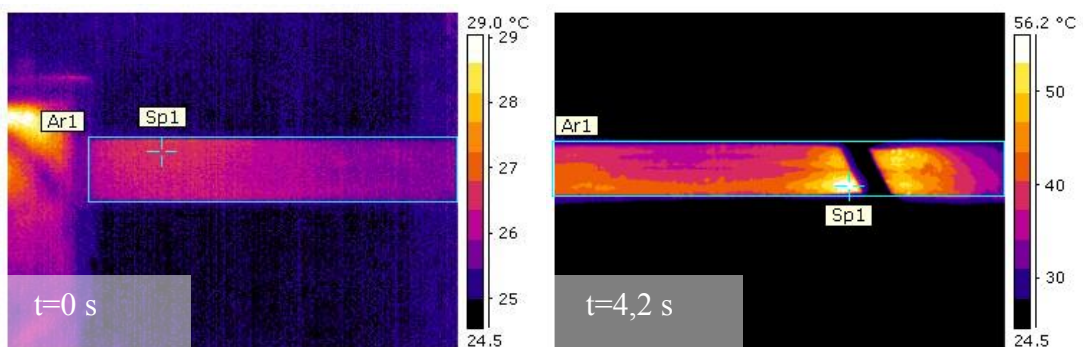
Obr. 7.6.1 vzorek při rychlosti posuvu 5 mm/s



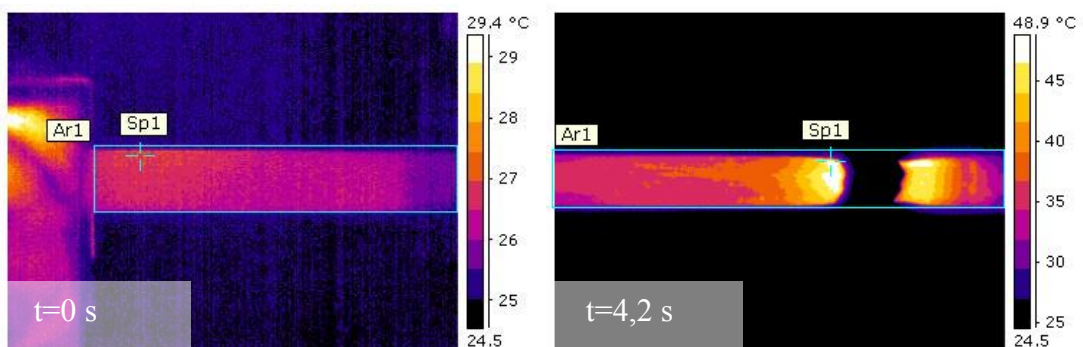
Obr. 7.6.2 vzorek při rychlosti posuvu 10 mm/s



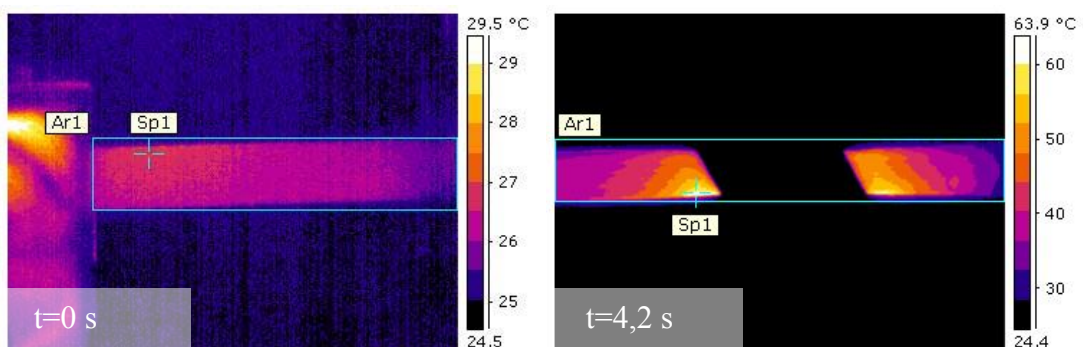
Obr. 7.6.3 vzorek při rychlosti posuvu 50 mm/s



Obr. 7.6.4 vzorek při rychlosti posuvu 100 mm/s

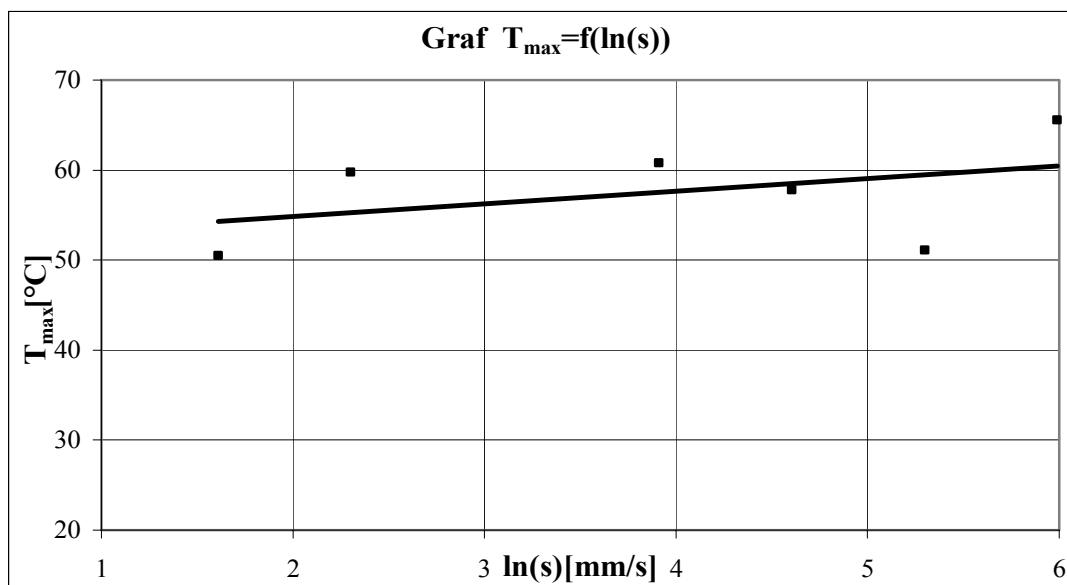


Obr. 7.6.5 vzorek při rychlosti posuvu 200 mm/s



Obr. 7.6.6 vzorek při rychlosti posuvu 400 mm/s

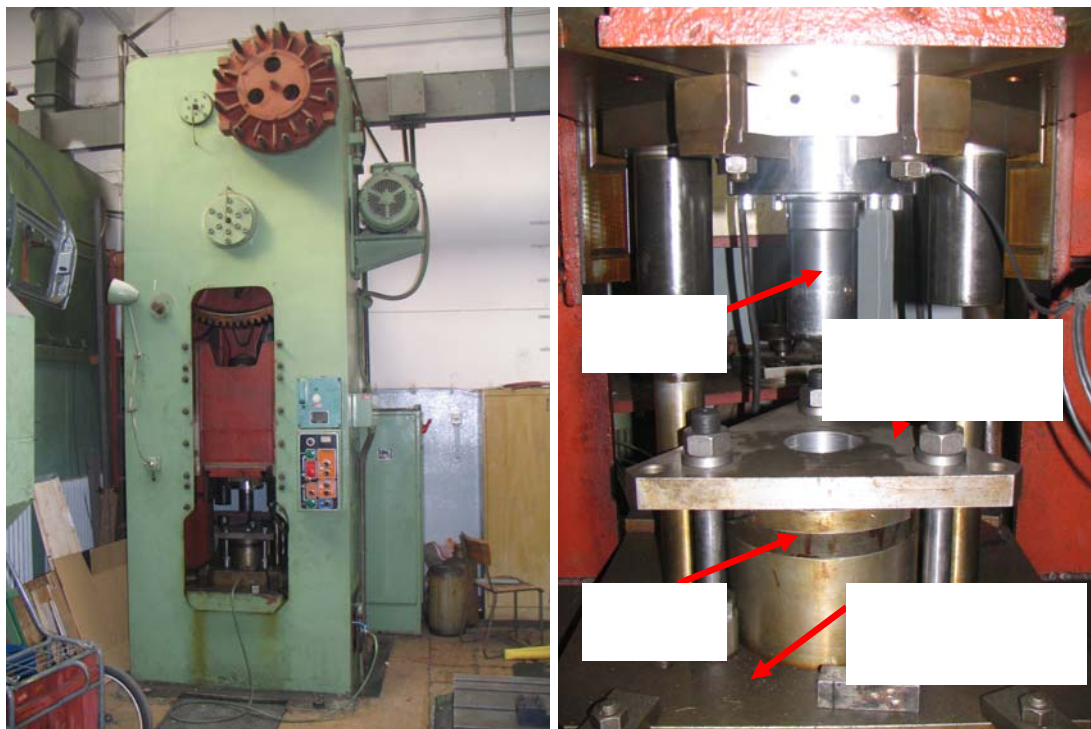




Obr. 7.6.7 Graf závislosti maximální teploty na logaritmu rychlosti posuvu

## 7.7 Tažení válcové nádoby měřené termokamerou Flir P65 Pal

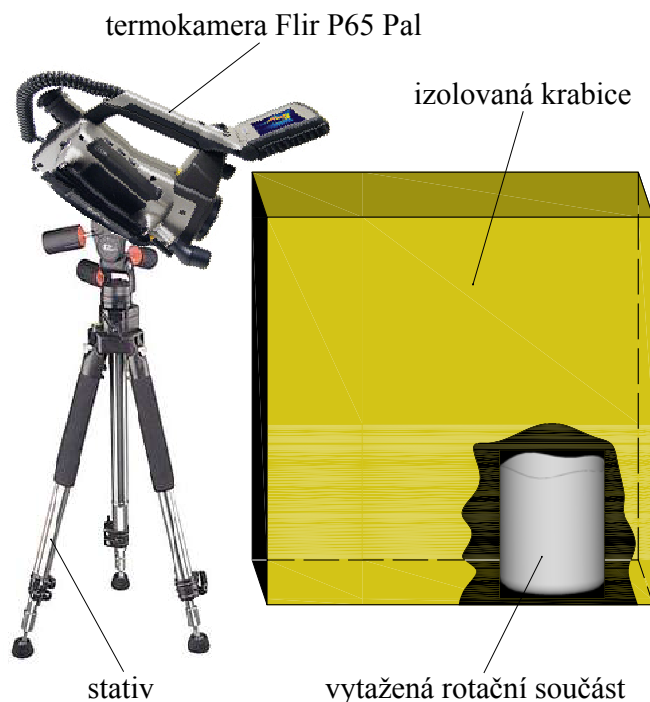
Toto termografické měření si klade za cíl zjistit, jaké vzniknou teploty v případě tažení plechu, při kterém působí jak deformace, tak tření. Měření bylo provedeno na klikovém lisu LU 160 (Obr.7.7.1) při různých přidržovacích tlacích (původně se zamýšlelo místo 12 MPa měřit 14 MPa, avšak při tomto přidržovacím tlaku se výtažek zasekával na tažníku, a nebylo možné ho měřit).



Obr.7.7.1 Klikový lis LU 160

Tab. 7.7.1 Podmínky při měření

Parametry objektu		
Emisivita	0,75	[-]
Odražená teplota	20	[°C]
Atmosferická teplota	20	[°C]
Relativní vlhkost	55	[%]
Vzdálenost	0,5	[m]

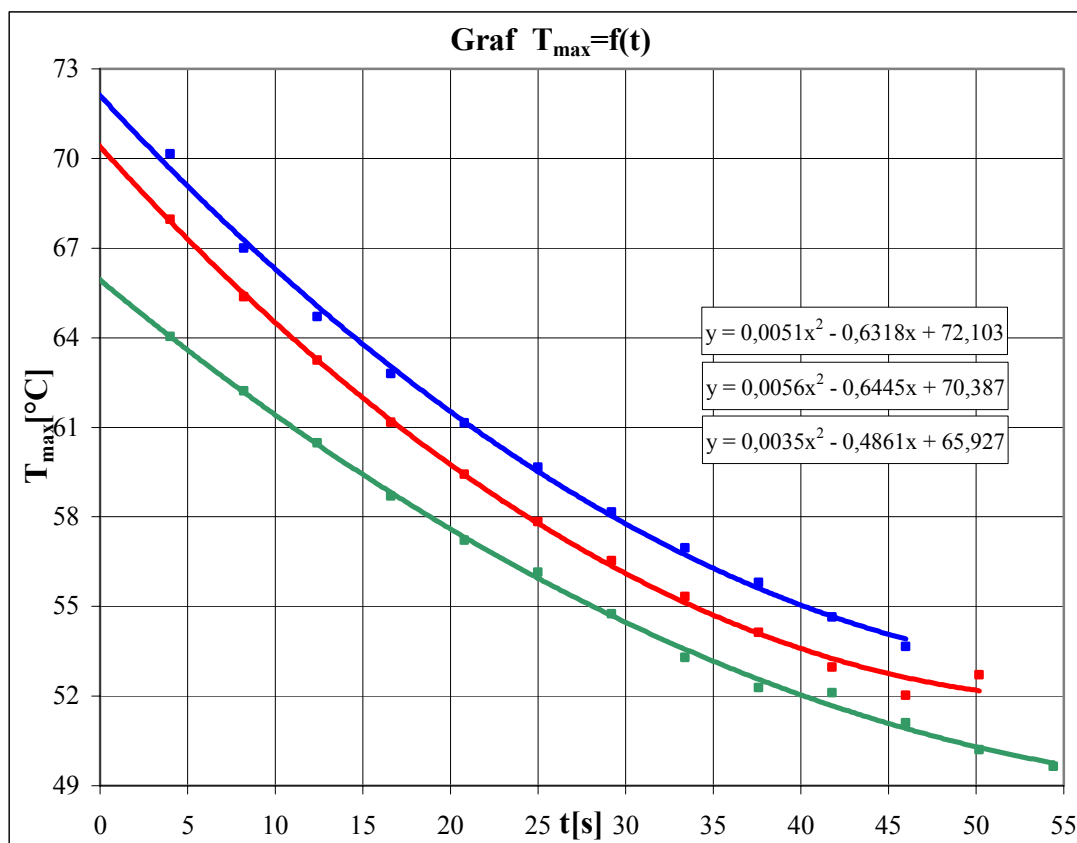


Obr.7.7.2 Schéma termografického měření rotační nádoby

Ihned po vytažení se výtažek vyfoukl z tažnice a vložil do předem připravené krabice, která plnila funkci izolace od okolních tepelných zdrojů. Termokamera se tedy pouštěla s jistým zpožděním, které je vyjádřeno jako 4 s od počátku. V grafu je pak použitý posun do času 0 s, který program Excel dopočítává z rovnice křivky proložené známými body. Hodnoty v tabulce jsou aritmetickými průměry tří měření pro daný přidržovací tlak.

Tab. 7.7.2 Naměřené maximální teploty

t[s]		4,0	8,2	12,4	16,6	20,8	25,0	29,2	33,4	37,6	41,8	46,0	50,2	54,4
T <sub>max</sub> [°C]	6MPa	64,0	62,2	60,5	58,7	57,2	56,2	54,8	53,3	52,3	52,1	51,1	50,2	49,7
	10MPa	68,0	65,4	63,2	61,2	59,4	57,8	56,5	55,3	54,1	53,0	52,0	52,7	-
	12MPa	70,2	67,0	64,7	62,8	61,2	59,7	58,2	57,0	55,8	54,7	53,7	-	-



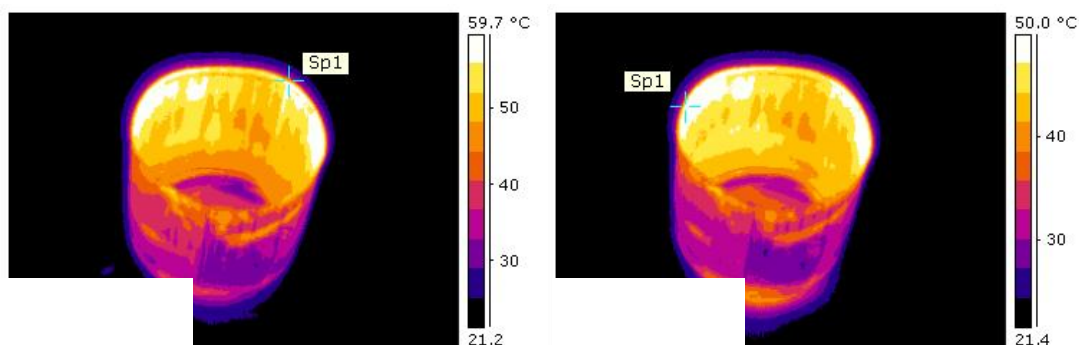
Obr. 7.7.3 Graf závislosti maximální teploty na čase zkoušky

Z grafu vyplývá, že maximální teploty na výtažku v čase 0 s jsou:

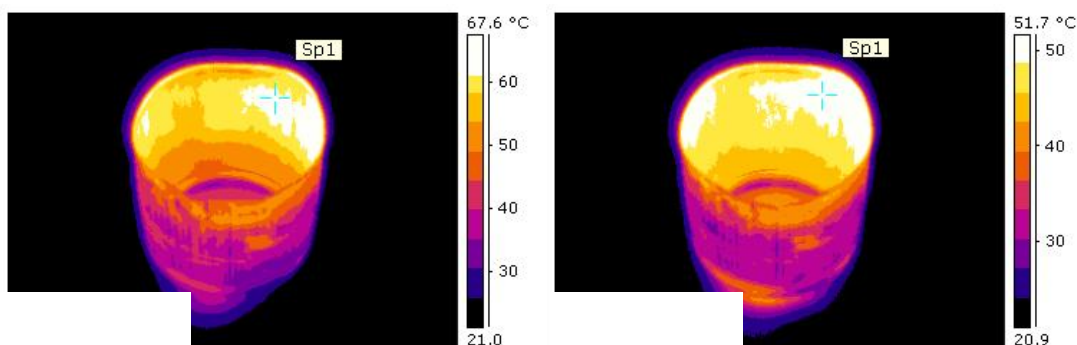
$$6 \text{ MPa} - \underline{T_{\max}} = \underline{65,9^{\circ}\text{C}},$$

$$10 \text{ MPa} - \underline{T_{\max}} = \underline{70,4^{\circ}\text{C}},$$

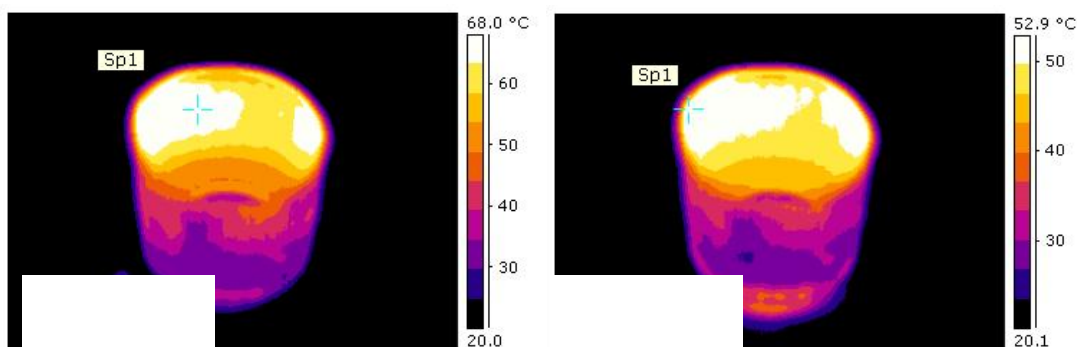
$$12 \text{ MPa} - \underline{T_{\max}} = \underline{72,1^{\circ}\text{C}}.$$



Obr. 7.7.4 Tlak přidržovače odpovídá 6 MPa



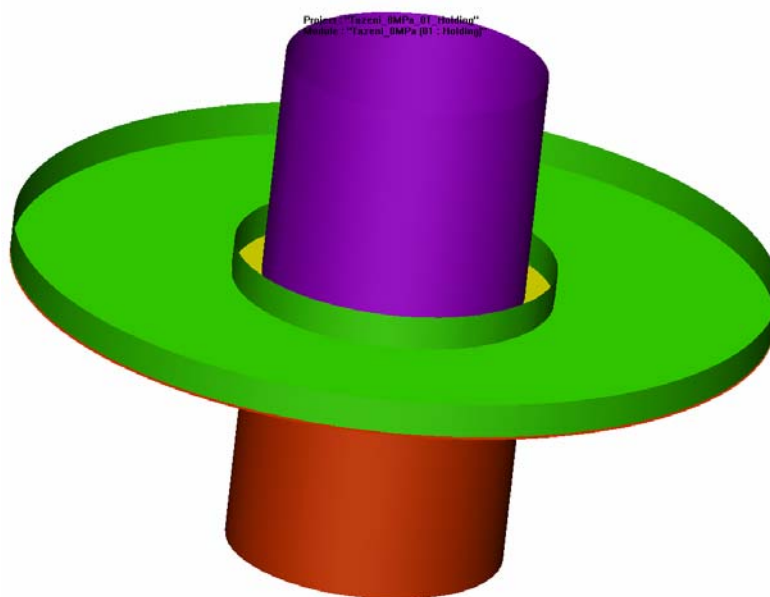
Obr. 7.7.5 Tlak přidržovače odpovídá 10 MPa



Obr. 7.7.6 Tlak přidržovače odpovídá 12 MPa

## 7.8 Simulace v prostředí PAM-Stampu 2G

Vlastní výpočet v prostředí PAM-Stampu 2G byl proveden za stejných podmínek jako tažení kelímků v předchozí kapitole 7.7 a s materiálovými hodnotami naměřenými v kapitole 7.2. To vše za účelem porovnání naměřených termogramů se simulacemi.

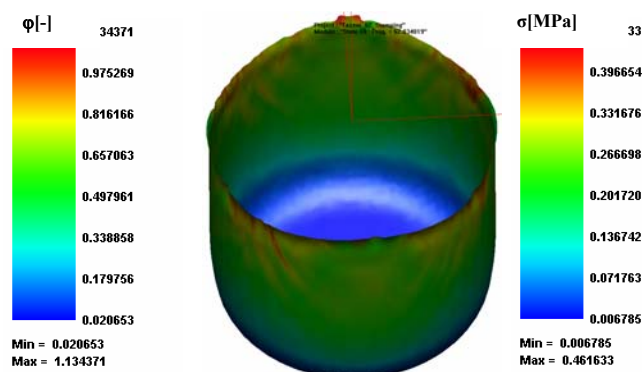


Obr. 7.8.1 Schéma nástrojů vymodelovaných v prostředí PAM-Stampu 2G

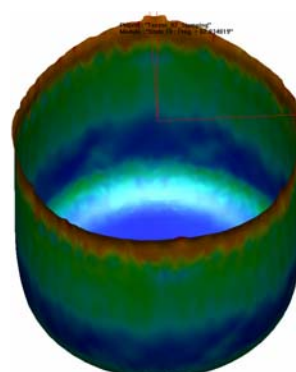


Tab. 7.8.1 Rozměry potřebné k vymodelování nástrojů

Vnitřní průměr přídržovače	85,4	[mm]
průměr plechu	164,6	[mm]
radius na tažníku	9,5	[mm]
radius na tažnici	6,5	[mm]
průměr tažníku	75,7	[mm]
průměr tažnice	80,0	[mm]

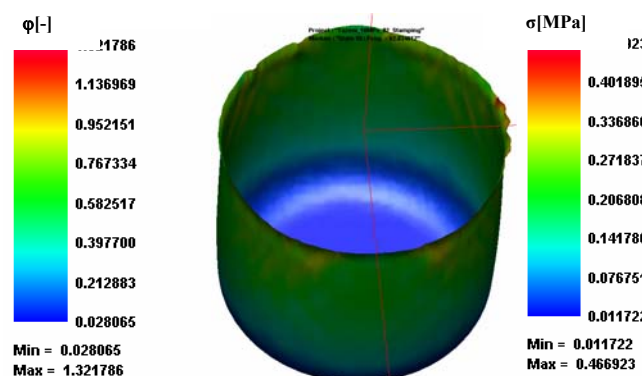


a) Deformace - membránová

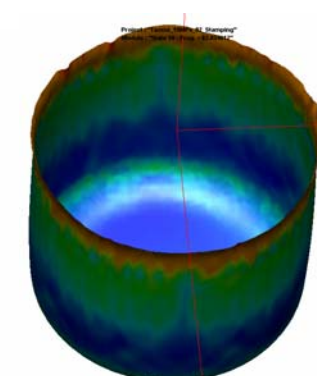


b) Napětí - membránové

Obr. 7.8.2 Simulace kelímků při přídržovacím tlaku 6 MPa

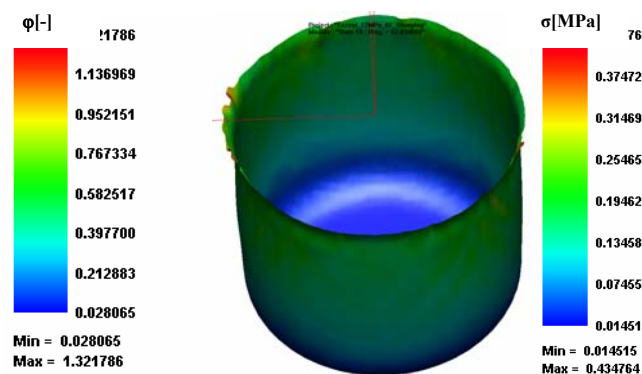


a) Deformace - membránová

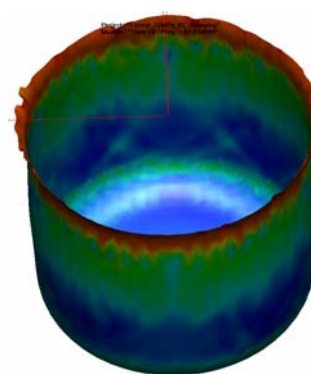


b) Napětí - membránové

Obr. 7.8.3 Simulace kelímků při přídržovacím tlaku 10 MPa



a) Deformace - membránová



b) Napětí - membránové

Obr. 7.8.4 Simulace kelímků při přídržovacím tlaku 12 MPa

## 8 Diskuse naměřených výsledků

V průběhu měření bylo prokázáno, že termografické měření videosekvencí má oproti obrázkovým sekvencím řadu nevýhod. Při snímání videosekvencí totiž docházelo k tomu problému, že termokamera nebyla schopná zachytit teplotu v reálném čase. Toto bylo zvláště patrné za vyšších rychlostí deformací při tahových zkouškách, kdy naměřená teplota nesmyslně rostla dlouho po přetržení měřeného vzorku. Další nevýhoda videosekvence byla v tom, že software termokamery nepodporuje její editaci, takže není možné zpětně měnit parametry objektu ani barevnou paletu termogramu. Jedinou nevýhodou obrázkové sekvence oproti videosekvenci pak zůstává, že není možné přesně určit okamžik ukončení zkoušky.

Při zpracování termogramů v programu ThermaCAM QuickView 2.0.2.12 bylo z hlediska algoritmu, který vypočítává výslednou naměřenou teplotu, nejvýraznějším faktorem odražená teplota a emisivita objektu. Ostatní tři faktory – atmosférická teplota, relativní vlhkost a vzdálenost objektu, se při našem měření projeví zanedbatelně.

První z termografických měření bylo měření tahové zkoušky, viz. kapitola 7.4. Zde je z grafů patrné, že za nízkých rychlostí deformace se maximální teplota prakticky nemění, a to až do meze pevnosti, kdy vzroste v místě vytvoření krčku. To je dáno jednak tím, že vzorek průběžně vyzařuje své teplo do atmosféry, a také tím, že toto měření bylo hodně negativně ovlivněné parametrem odražené teploty. Z Obr. 7.4.4.1 (v čase  $t=0$  s) je patrné, že na odražené teplotě se podílel dokonce i objektiv samotné termokamery. Tento problém byl vyřešen tím, že se termokamera umístila jinak než kolmo na vzorek. I tak ale bylo měření velice nepřesvědčivé a naměřená teplota nižší, než by se dala očekávat (prostým hmatem při vyjímání vzorku z čelistí bylo cítit, že teplota musí být vyšší než je naměřená). Proto bylo měření opakováno v kapitole 7.6 s použitím krycí látky, která měla odrušit odraženou teplotu a zároveň zvýšit emisivitu objektu. Jak je patrné z naměřených hodnot, tento pokus se rozhodně podařil, protože naměřené teploty vzrostly prakticky dvojnásobně. Také se dá ze závislosti na Obr. 7.6.7 určit, že naměřená teplota prakticky nezávisí na rychlosti posuvu. Mírný nárůst teploty za vyšších rychlostí posuvu totiž pokryje zvýšený vliv sálání.

Tribologické zkoušky, viz. kapitola 7.5, dopadly dle předpokladu, to znamená, že vzorky vykazovaly vyšší teploty při zvýšení rychlosti posuvu.

K popsání této závislosti byl použit polynom druhého stupně. Stejně tak se potvrdilo, že zvýšený tlak mezi čelistmi zvyšuje i naměřenou maximální teplotu vzorku. Toto vše je patrné ze závislosti na Obr. 7.5.7.1. Stále se ale objevoval problém s odraženou teplotou.

Naproti tomu při měření vytažených kelímků byla odražená teplota eliminována izolováním prostoru měření. A jak je patrné z naměřených hodnot a závislosti na Obr. 7.7.3, zdají se být tyto hodnoty velice věrohodné. Stejně tak naměřené teploty v termogramech jsou při porovnání s deformačními simulacemi programu PAM-Stamp 2G správně rozložené a mají podobný charakter.

## 9 Závěr

Cílem diplomové práce bylo zjistit spojitost mezi vzniklou deformací při operaci tváření a naměřenými termogramy. Závěrem tedy můžeme konstatovat, že pro věrohodné termografické měření tohoto materiálu, je prakticky nutné odrušit vliv odražené teploty. Toho se dá dosáhnout buď jednou z metod popsanych v kapitole 3.3.3, nebo izolováním prostoru s měřeným vzorkem od okolních tepelných zdrojů, což ale není vždy technicky proveditelné. Jak bylo v diskusi naměřených hodnot také zjištěno, olej na povrchu vzorku má velký vliv na výsledné naměřené teploty. S tímto faktem je spojená nepřesnost měření v případě, že se olej po operaci lisování vytlačí nerovnoměrně na povrchu výtažku. Potom totiž není možné termograficky měřit povrch takového výtažku za konstantního parametru emisivity. Z těchto důvodů je uvedená metoda měření deformace na výtažcích pro tento konkrétní materiál možná jen za vyloženě laboratorních podmínek, a pro praxi se nehodí.

## **Použitá literatura**

- [1] TMĚJ,J - MIKEŠ,V: *Teorie Tváření*, Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1990, 177s. ISBN 80-7083-011-5.
- [2] BAREŠ,K A KOL.: *Lisování*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1971, 542s.
- [3] BRADÁČ,J.: *Optimalizace výroby svodu výfukového potrubí*, [Diplomová práce], Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 2003.
- [4] STRNADOVÁ,J.: *Simulace odpružení při tažení výlisků z pevnost*, [Diplomová práce], Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 2001.
- [5] PWO UNITOOLS CZ: *Autoform*, [26.2.2007].  
<<http://www.unitools.cz/cz/vyvoj-a-vyroba/k-autoform.php>>
- [6] ESI Group: *PAM-Stamp 2G*, [26.2.2007].  
<[http://www.esi-group.com/SimulationSoftware/Stamping\\_simulation/](http://www.esi-group.com/SimulationSoftware/Stamping_simulation/)>
- [7] DYTRON: *Catia Solutions*, [12.3.2007].  
<[http://www.dytron.cz/asp/catia\\_v5.asp](http://www.dytron.cz/asp/catia_v5.asp)>
- [8] STŘEDA,I - SAZIMA,M - DOUBRAVA,J: *Termomechanika*, Praha: České vysoké učení v Praze, 1992, 254s.
- [9] QTEST: *Princip bezdotykového měření teplot a vysvětlení základních pojmů*, [2.4.2007].  
<[http://www.qtest.cz/Bezdotykove\\_tplomery/sides/princip.htm](http://www.qtest.cz/Bezdotykove_tplomery/sides/princip.htm)>
- [10] TERMOVIZE: *Základy měření teploty, tepla a infraradiace*, [14.3.2007].  
<<http://www.termovize.com/>>
- [11] WIKIPEDIE: *Planckův vyzařovací zákon*, [24.3.2007].  
<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Planck%C5%AFv\\_vyza%C5%99ovac%C3%AD\\_z%C3%A1kon](http://cs.wikipedia.org/wiki/Planck%C5%AFv_vyza%C5%99ovac%C3%AD_z%C3%A1kon)>
- [12] WIKIPEDIE: *Wienův posunovací zákon*, [24.3.2007].  
<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Wien%C5%AFv\\_posunovac%C3%AD\\_z%C3%A1kon](http://cs.wikipedia.org/wiki/Wien%C5%AFv_posunovac%C3%AD_z%C3%A1kon)>
- [13] WIKIPEDIE: *Stefanův-Boltzmannův zákon*, [24.3.2007].  
<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Stefan%C5%AFv-Boltzmann%C5%AFv\\_z%C3%A1kon](http://cs.wikipedia.org/wiki/Stefan%C5%AFv-Boltzmann%C5%AFv_z%C3%A1kon)>
- [14] PTÁČEK,J - JENČÍK,J - ČERNÝ,M - BOROVIČKA,M - Ramert,B: *Měření teploty v průmyslu 1.část*, Praha: DT ČSVTS, 1993, 339s.

- [15] ATELIER DEK: *Termovize*, [27.3.2007].  
<[http://www.atelier-dek.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=16&Itemid=30](http://www.atelier-dek.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=16&Itemid=30)>
- [16] KNILL,D: *Teorie termografie*, [15.3.2007].  
<<http://www.infrakamera.cz/teorie-termografie.php>>
- [17] TMV SS: *Nová termovizní kamera InfraCAM*, [8.3.2007].  
<<http://www.odbornecasopisy.cz/automa/2006/au020654.htm>>
- [18] AHLBORN MĚŘICÍ A REGULAČNÍ TECHNIKA: *Termokamera Fluke Ti55/20 FT*, [14.3.2007].  
<<http://www.termokamery.cz/cs/produkt/termokamera-fluke-ti-55-20-ft/>>
- [19] TSI SYSTEM: *Termokamery*, [15.3.2007].  
<<http://www.tsisystem.cz/produkty/termokamery--66>>
- [20] TMV SS: *Nedestruktivní defektoskopie*, [8.3.2007].  
<<http://www.tmvss.cz/flir/termovize/cm.html>>
- [21] FLIR SYSTEMS: *ThermaCAM P65*, [20.3.2007].  
<[http://www.flirthermography.com/czech/cameras/camera.asp?camera\\_id=1044&](http://www.flirthermography.com/czech/cameras/camera.asp?camera_id=1044&)>
- [22] PLUHAŘ,J - PUŠKR,A - KOUTSKÝ,J - MACEK,K - BENEŠ,V: *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987, 418s.
- [23] ALAXIN,J: *Fyzikální metalurgie I*, Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1982, 265s.
- [24] ALAXIN,J: *Fyzikální metalurgie II*, Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1986, 446s.
- [25] DEKMETAL: *Pozinkované plechy*, [6.4.2007].  
<[http://www.dekmetal.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=22&Itemid=10](http://www.dekmetal.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=22&Itemid=10)>
- [26] KLÖCKNER STAHLHANDEL CZ: *Porovnávací tabulky jakosti plechů válcovaných za tepla*, [18.3.2007].  
<<http://www.stahlhandel.cz/data/tabulky1.htm?PHPSESSID=cfe838d419b8908fae9587c4cb596725>>
- [27] QUALITE: *Žárové zinkování*, [5.4.2007].  
<<http://www.qualite.cz/zinkovani.htm>>
- [28] GALVA: *Galvanické zinkování*, [12.3.2007].  
<<http://www.galva.cz/pgs21.php>>

## **Seznam Příloh**

**Příloha č. 1: Protokoly ze statické zkoušky tahem TIRAtest 2300**

**Příloha č. 2: Protokoly ze statické zkoušky tahem Sokol 400**

**Příloha č. 3: Protokoly ze statické zkoušky tahem Sokol 400 s olejovou vrstvou**

**Příloha č. 4: Protokoly z tribologické zkoušky**

## Příloha č. 1:

# Statická zkouška tahem

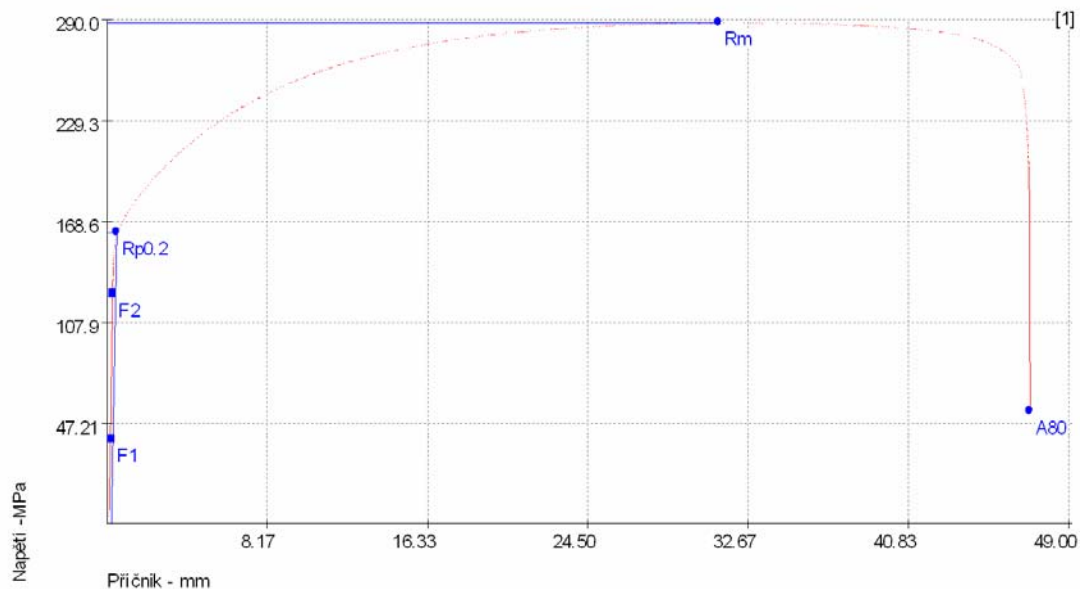
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: : DX53D+ZE      Zkušební norma : ČSN EN 10 0002-1  
Směr odebrání vzorku: : 45°      Datum testu : 3.4.2007  
Rozměr vzorku: : 20,1 x 0,81      Vypracoval: : Jan Wimmer  
Rychlost posuvu: : 10 mm/min

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>80</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	287.95	39.94	161.71
2	294.63	40.36	175.52
3	299.29	41.04	182.94
4	309.41	40.73	190.55
5	282.97	41.56	156.73
6	295.40	39.40	175.12
7	297.99	40.41	181.52
8	309.21	44.80	191.12
x	296.99	40.98	176.78
s	8.64	1.56	11.67

Zkouška 1



Technická univerzita v Liberci FS  
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632



# Statická zkouška tahem

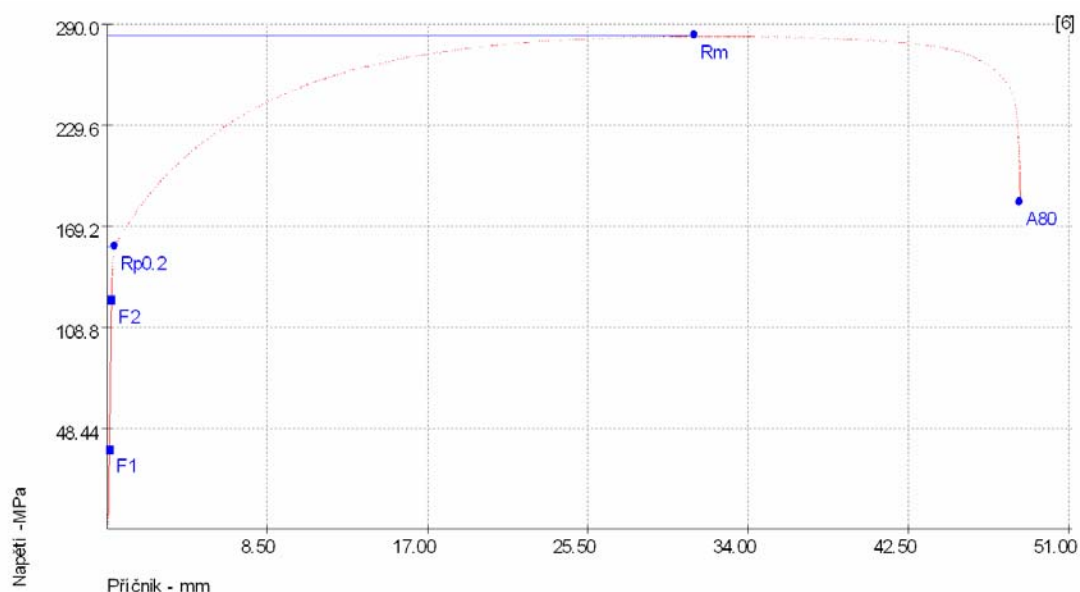
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: : DX53D+ZE      Zkušební norma : ČSN EN 10 0002-1  
Směr odebrání vzorku: : 45°      Datum testu : 3.4.2007  
Rozměr vzorku: : 20,1 x 0,81      Vypracoval: : Jan Wimmer  
Rychlost posuvu: : 10 mm/min

## Výstupní hodnoty

Zkouška	Rm MPa	A80 %	Rp0.2 MPa
1	287.95	39.94	161.71
2	294.63	40.36	175.52
3	299.29	41.04	182.94
4	309.41	40.73	190.55
5	282.97	41.56	156.73
6	295.40	39.40	175.12
7	297.99	40.41	181.52
8	309.21	44.80	191.12
x	296.99	40.98	176.78
s	8.64	1.56	11.67

Zkouška 5



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

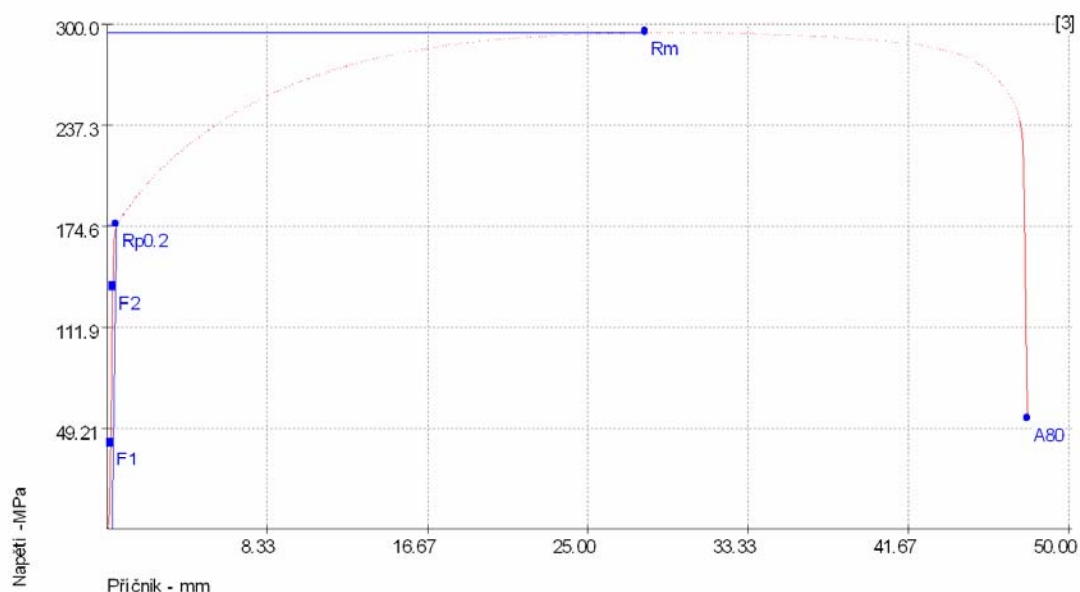
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: : DX53D+ZE      Zkušební norma : ČSN EN 10 0002-1  
Směr odebrání vzorku: : 45°      Datum testu : 3.4.2007  
Rozměr vzorku: : 20,1 x 0,81      Vypracoval: : Jan Wimmer  
Rychlost posuvu: : 50 mm/min

## Výstupní hodnoty

Zkouška	Rm MPa	A80 %	Rp0.2 MPa
1	287.95	39.94	161.71
2	294.63	40.36	175.52
3	299.29	41.04	182.94
4	309.41	40.73	190.55
5	282.97	41.56	156.73
6	295.40	39.40	175.12
7	297.99	40.41	181.52
8	309.21	44.80	191.12
x	296.99	40.98	176.78
s	8.64	1.56	11.67

Zkouška 2



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

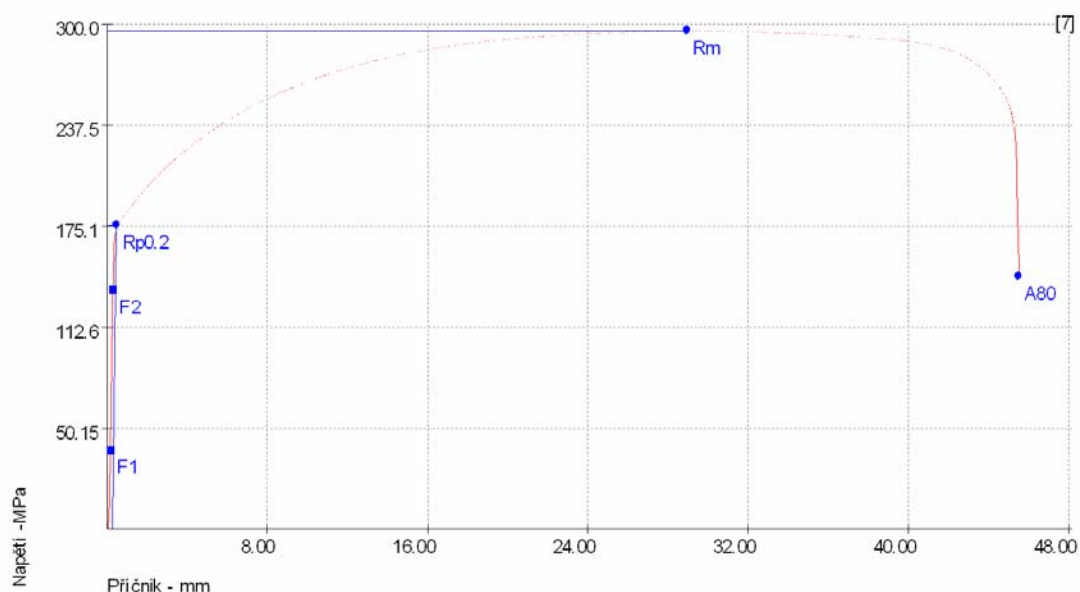
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	50 mm/min		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	Rm MPa	A80 %	Rp0.2 MPa
1	287.95	39.94	161.71
2	294.63	40.36	175.52
3	299.29	41.04	182.94
4	309.41	40.73	190.55
5	282.97	41.56	156.73
6	295.40	39.40	175.12
7	297.99	40.41	181.52
8	309.21	44.80	191.12
x	296.99	40.98	176.78
s	8.64	1.56	11.67

Zkouška 6



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

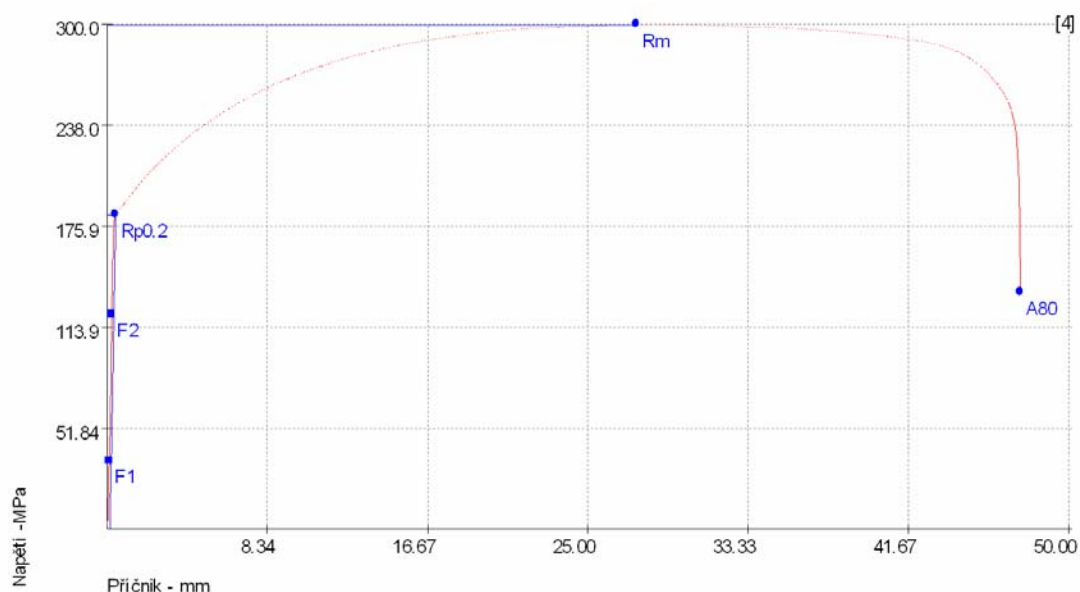
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: : DX53D+ZE      Zkušební norma : ČSN EN 10 0002-1  
Směr odebrání vzorku: : 45°      Datum testu : 3.4.2007  
Rozměr vzorku: : 20,1 x 0,81      Vypracoval: : Jan Wimmer  
Rychlost posuvu: : 100 mm/min

## Výstupní hodnoty

Zkouška	Rm MPa	A80 %	Rp0.2 MPa
1	287.95	39.94	161.71
2	294.63	40.36	175.52
3	299.29	41.04	182.94
4	309.41	40.73	190.55
5	282.97	41.56	156.73
6	295.40	39.40	175.12
7	297.99	40.41	181.52
8	309.21	44.80	191.12
x	296.99	40.98	176.78
s	8.64	1.56	11.67

Zkouška 3



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

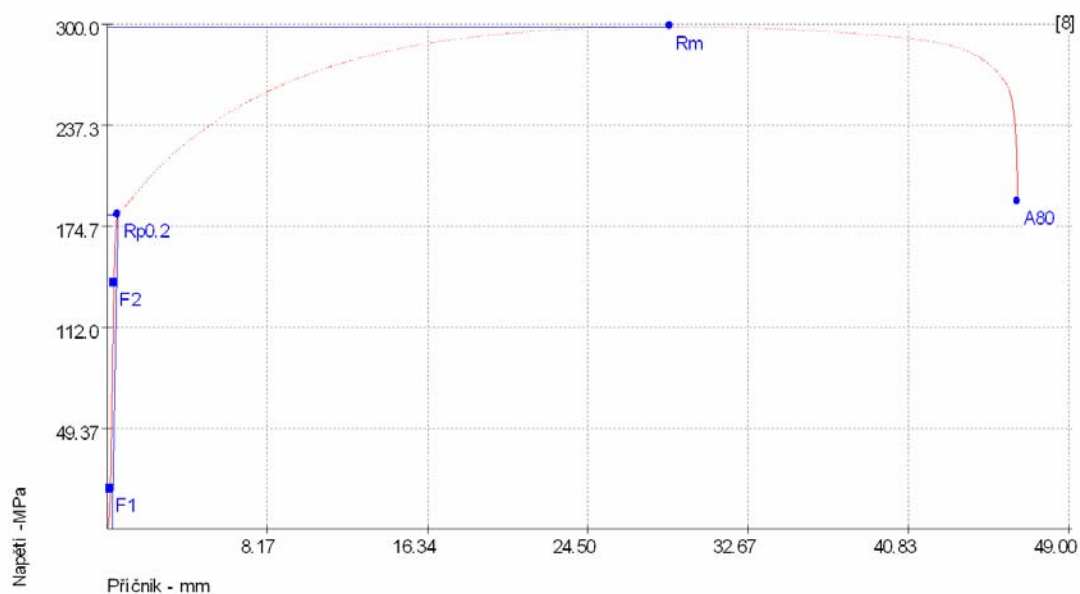
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: : DX53D+ZE      Zkušební norma : ČSN EN 10 0002-1  
Směr odebrání vzorku: : 45°      Datum testu : 3.4.2007  
Rozměr vzorku: : 20,1 x 0,81      Vypracoval: : Jan Wimmer  
Rychlost posuvu: : 100 mm/min

## Výstupní hodnoty

Zkouška	Rm MPa	A80 %	Rp0.2 MPa
1	287.95	39.94	161.71
2	294.63	40.36	175.52
3	299.29	41.04	182.94
4	309.41	40.73	190.55
5	282.97	41.56	156.73
6	295.40	39.40	175.12
7	297.99	40.41	181.52
8	309.21	44.80	191.12
x	296.99	40.98	176.78
s	8.64	1.56	11.67

Zkouška 7



Technická univerzita v Liberci FS  
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

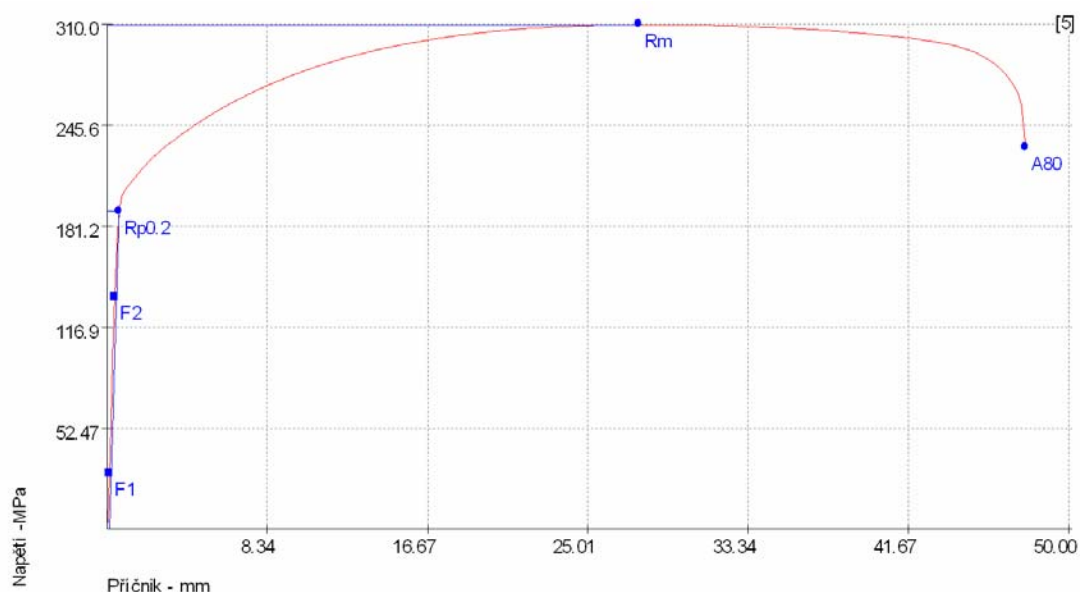
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: : DX53D+ZE      Zkušební norma : ČSN EN 10 0002-1  
Směr odebrání vzorku: : 45°      Datum testu : 3.4.2007  
Rozměr vzorku: : 20,1 x 0,81      Vypracoval: : Jan Wimmer  
Rychlost posuvu: : 600 mm/min

## Výstupní hodnoty

Zkouška	Rm MPa	A80 %	Rp0.2 MPa
1	287.95	39.94	161.71
2	294.63	40.36	175.52
3	299.29	41.04	182.94
4	309.41	40.73	190.55
5	282.97	41.56	156.73
6	295.40	39.40	175.12
7	297.99	40.41	181.52
8	309.21	44.80	191.12
x	296.99	40.98	176.78
s	8.64	1.56	11.67

Zkouška 4



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

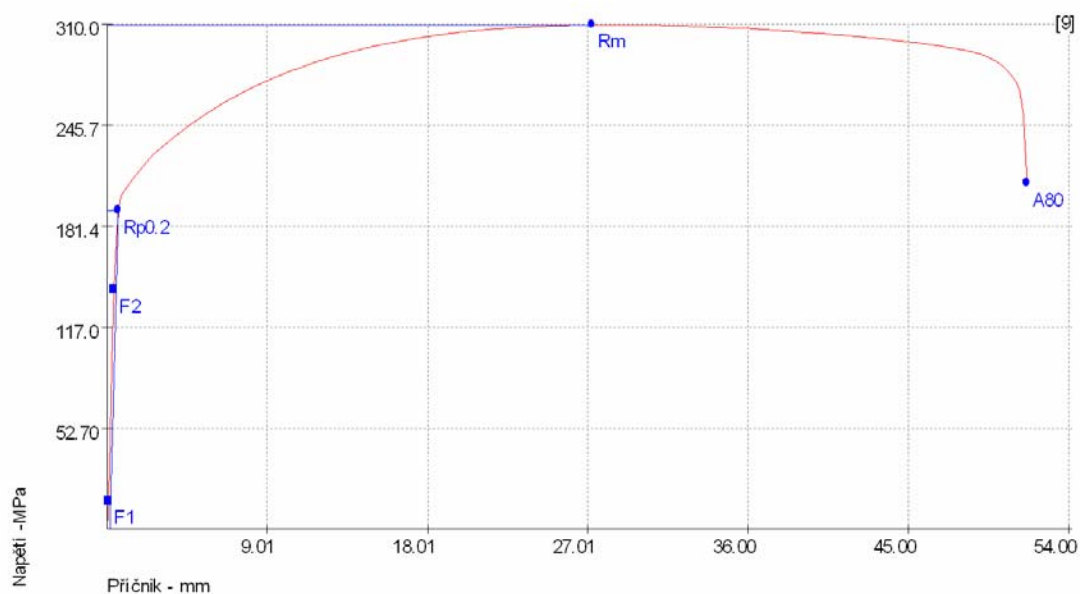
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	600 mm/min		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	Rm MPa	A80 %	Rp0.2 MPa
1	287.95	39.94	161.71
2	294.63	40.36	175.52
3	299.29	41.04	182.94
4	309.41	40.73	190.55
5	282.97	41.56	156.73
6	295.40	39.40	175.12
7	297.99	40.41	181.52
8	309.21	44.80	191.12
x	296.99	40.98	176.78
s	8.64	1.56	11.67

Zkouška 8



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632



## Příloha č. 2:

# Statická zkouška tahem

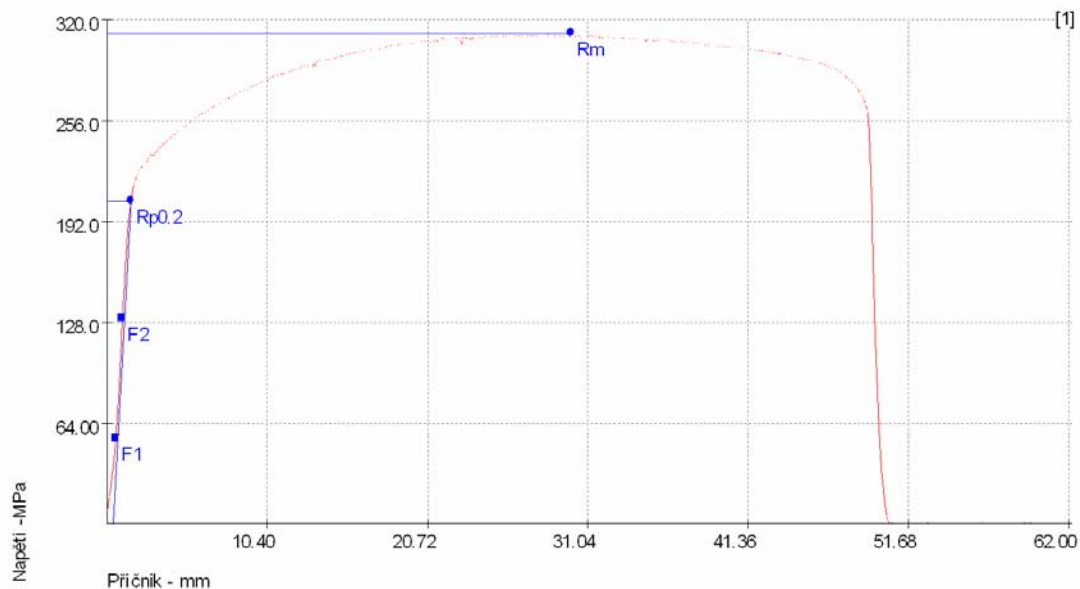
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	50 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	311.12	42.62	204.54
2	319.56	43.47	211.64
x	315.34	43.05	208.09
s	5.97	0.60	5.02

Zkouška 1



**Technická univerzita v Liberci FS**  
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hálkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632



# Statická zkouška tahem

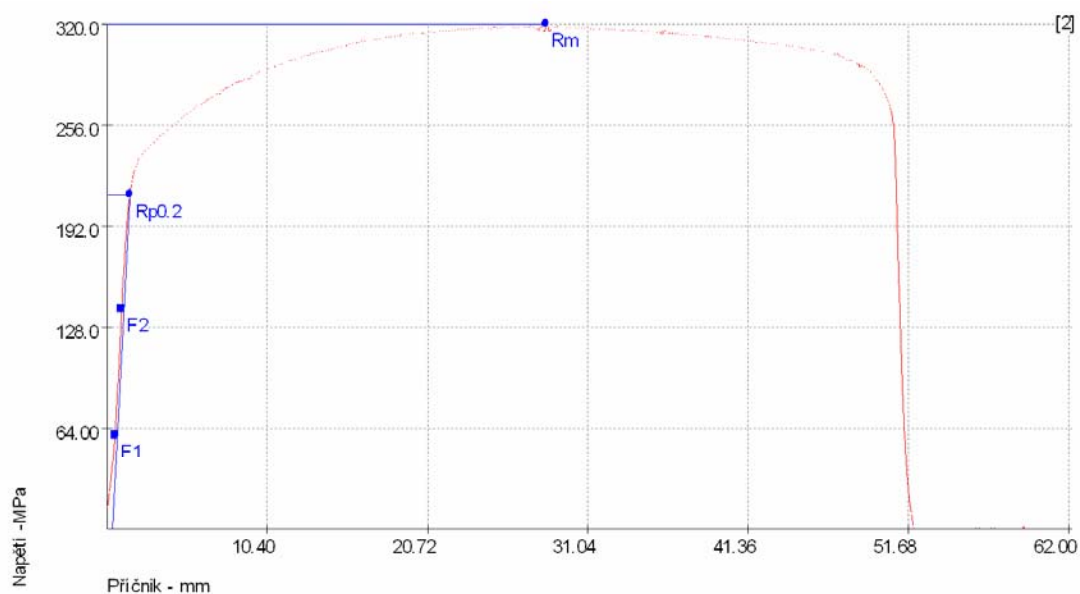
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: : DX53D+ZE      Zkušební norma : ČSN EN 10 0002-1  
Směr odebrání vzorku: : 45°      Datum testu : 3.4.2007  
Rozměr vzorku: : 20,1 x 0,81      Vypracoval: : Jan Wimmer  
Rychlost posuvu: : 50 mm/s

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	311.12	42.62	204.54
2	319.56	43.47	211.64
x	315.34	43.05	208.09
s	5.97	0.60	5.02

Zkouška 2



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

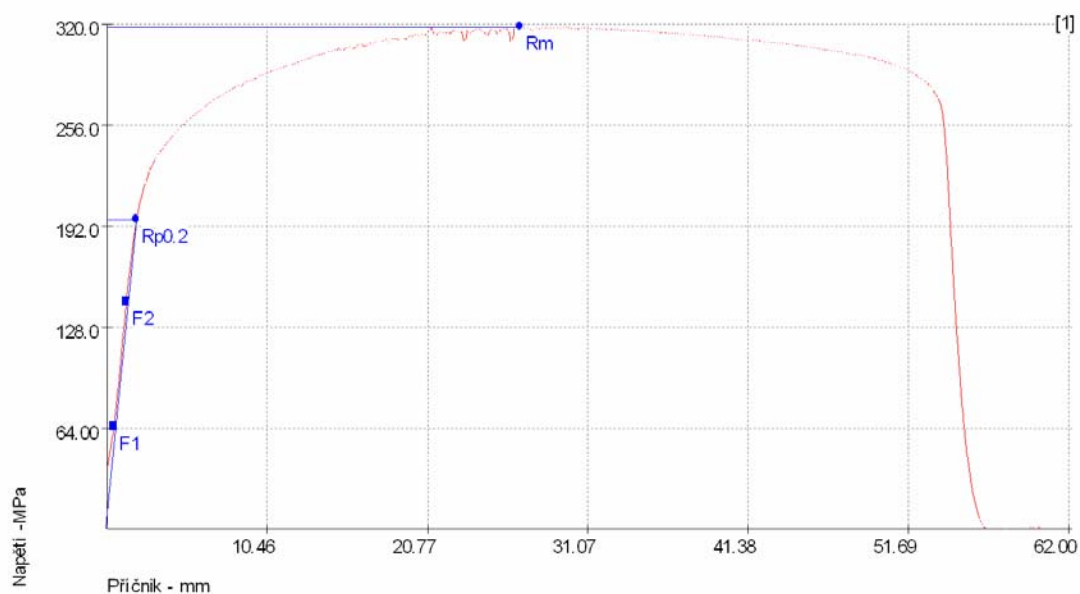
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	100 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	317.91	47.17	195.86
2	315.37	47.76	194.45
x	316.64	47.47	195.15
s	1.80	0.42	0.99

Zkouška 1



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

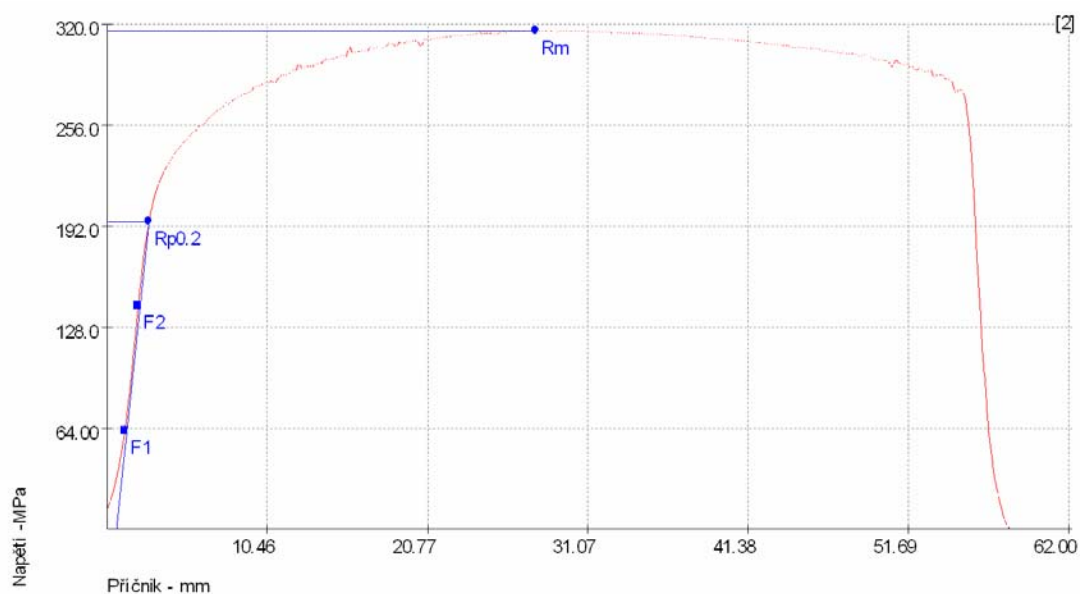
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	100 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	317.91	47.17	195.86
2	315.37	47.76	194.45
x	316.64	47.47	195.15
s	1.80	0.42	0.99

Zkouška 2



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

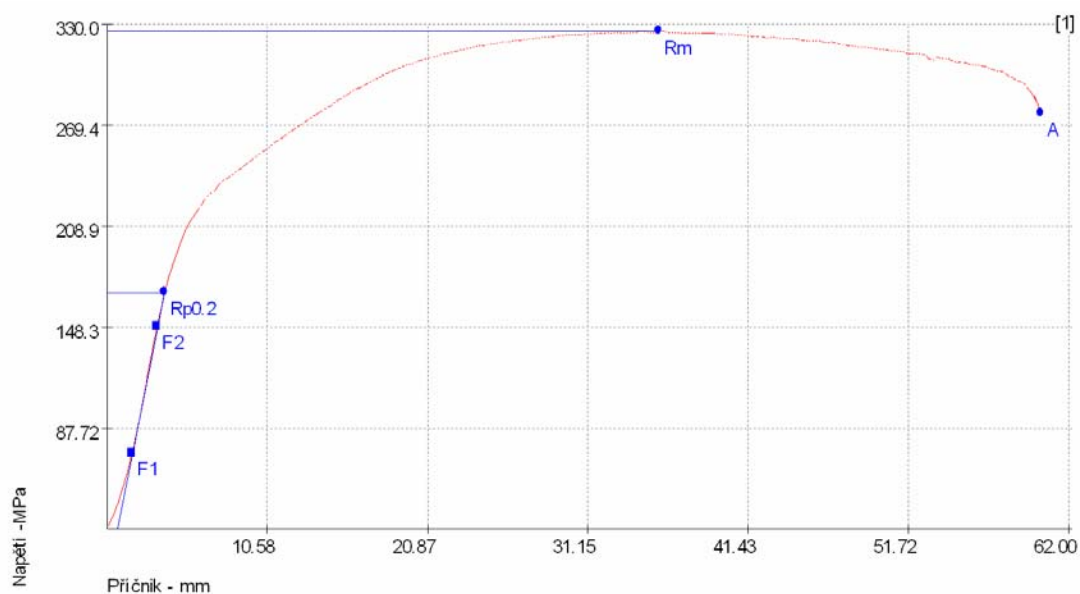
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	200 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	325.44	48.71	169.04
2	323.32	49.40	171.84
x	324.38	49.06	170.44
s	1.50	0.49	1.98

Zkouška 1



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

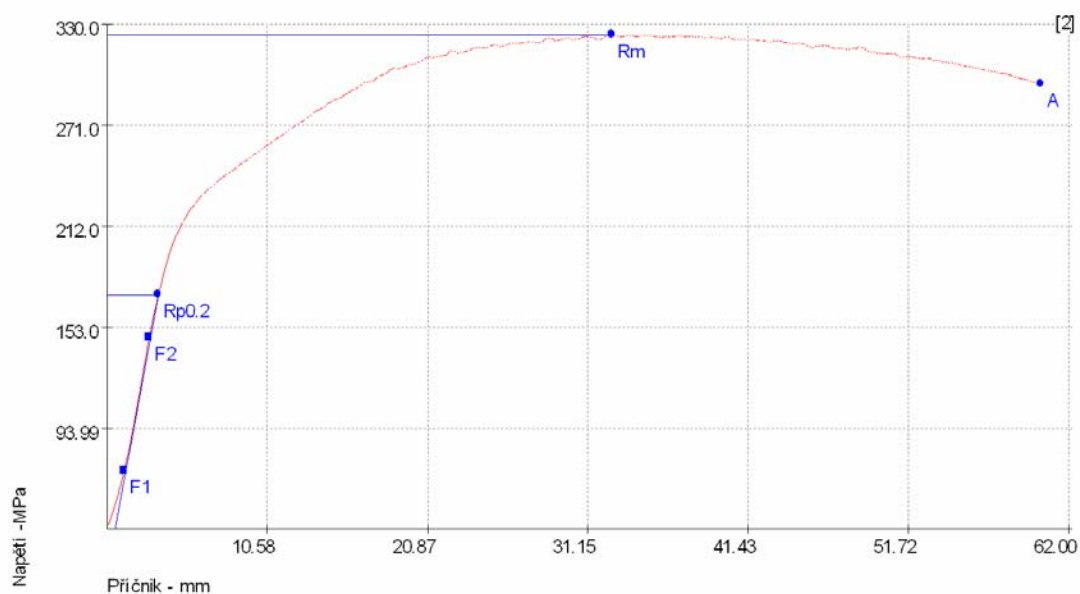
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	200 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	325.44	48.71	169.04
2	323.32	49.40	171.84
x	324.38	49.06	170.44
s	1.50	0.49	1.98

Zkouška 2



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

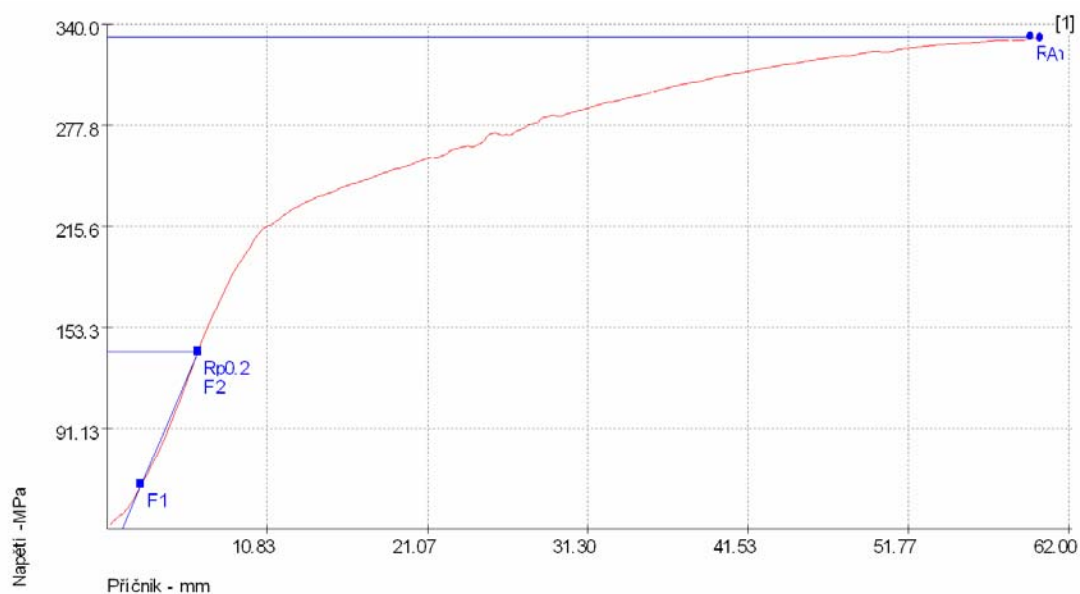
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	400 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	331.74	47.52	138.29
2	331.58	47.31	134.00
x	331.66	47.42	136.15
s	0.11	0.15	3.04

Zkouška 1



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

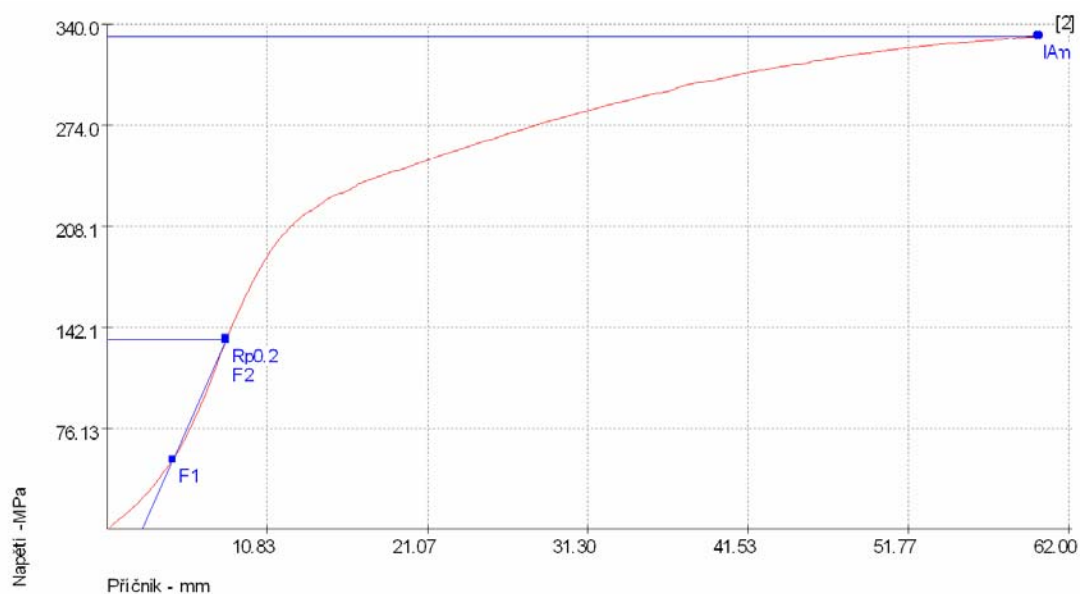
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	400 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	331.74	47.52	138.29
2	331.58	47.31	134.00
x	331.66	47.42	136.15
s	0.11	0.15	3.04

Zkouška 2



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632



### Příloha č. 3:

# Statická zkouška tahem

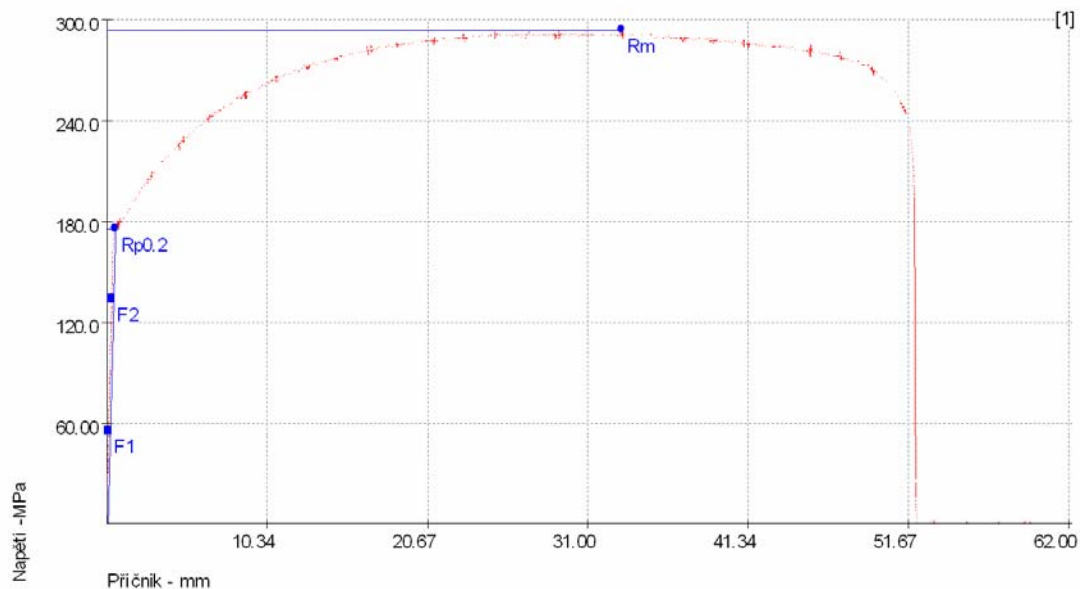
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	5 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A %	R <sub>p0.2</sub> MPa
	293.48	46.89	175.44
2	288.90	49.48	173.25
x	291.19	48.18	174.34
s	3.24	1.83	1.55

Zkouška 1



**Technická univerzita v Liberci FS**  
**Katedra strojírenské technologie**

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hálkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632



# Statická zkouška tahem

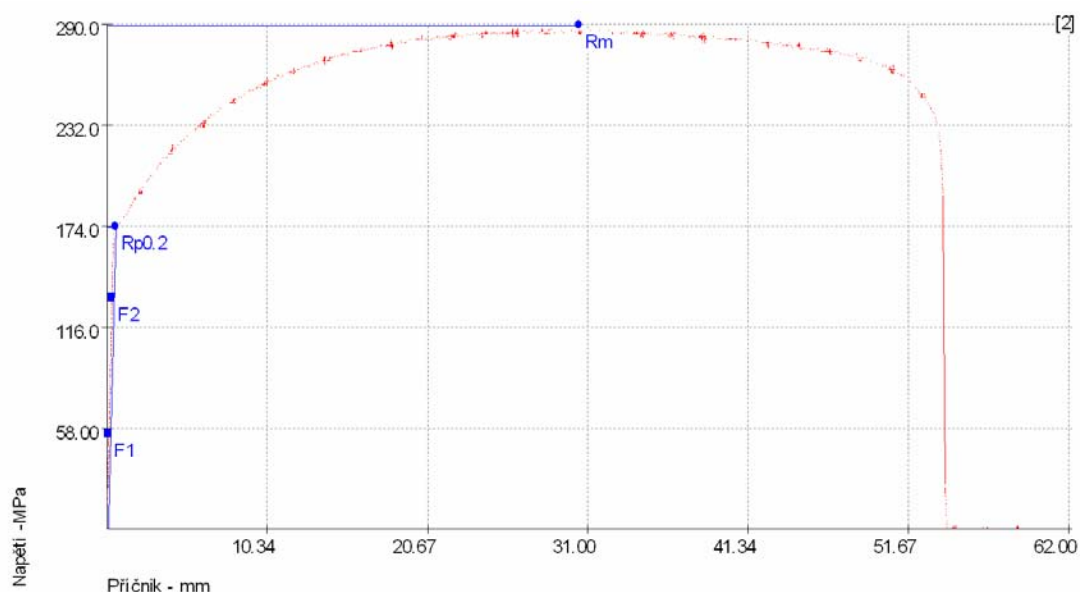
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: : DX53D+ZE      Zkušební norma : ČSN EN 10 0002-1  
Směr odebrání vzorku: : 45°      Datum testu : 3.4.2007  
Rozměr vzorku: : 20,1 x 0,81      Vypracoval: : Jan Wimmer  
Rychlost posuvu: : 5 mm/s

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	293.48	46.89	175.44
2	288.90	49.48	173.25
x	291.19	48.18	174.34
s	3.24	1.83	1.55

Zkouška 2



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

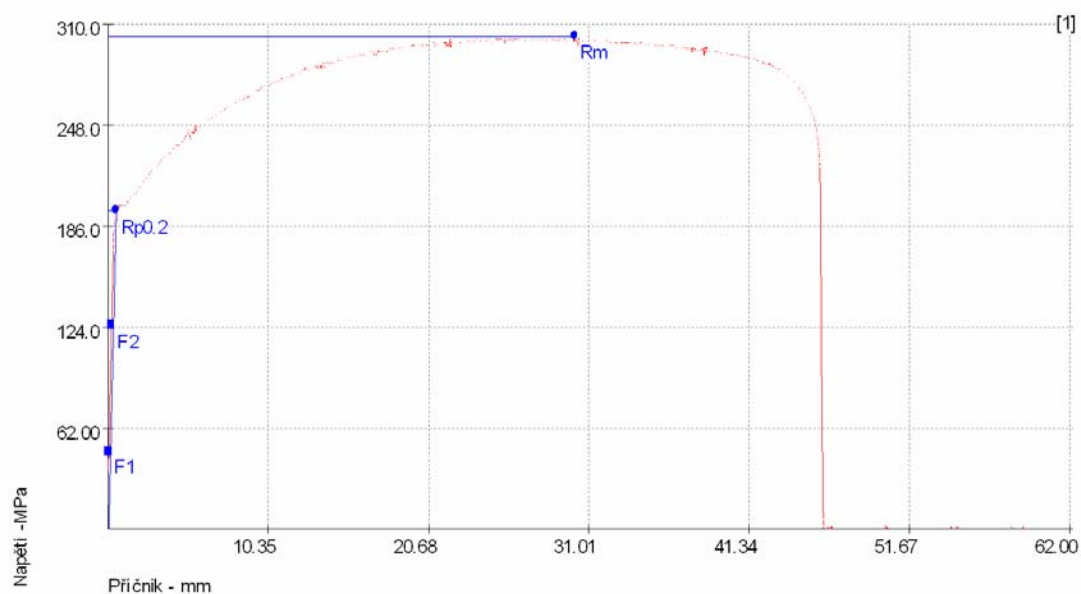
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: : DX53D+ZE      Zkušební norma : ČSN EN 10 0002-1  
Směr odebrání vzorku: : 45°      Datum testu : 3.4.2007  
Rozměr vzorku: : 20,1 x 0,81      Vypracoval: : Jan Wimmer  
Rychlost posuvu: : 10 mm/s

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>80</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	302.15	39.53	195.37
2	303.27	37.60	198.04
x	302.71	38.56	196.71
s	0.79	1.36	1.89

Zkouška 1



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

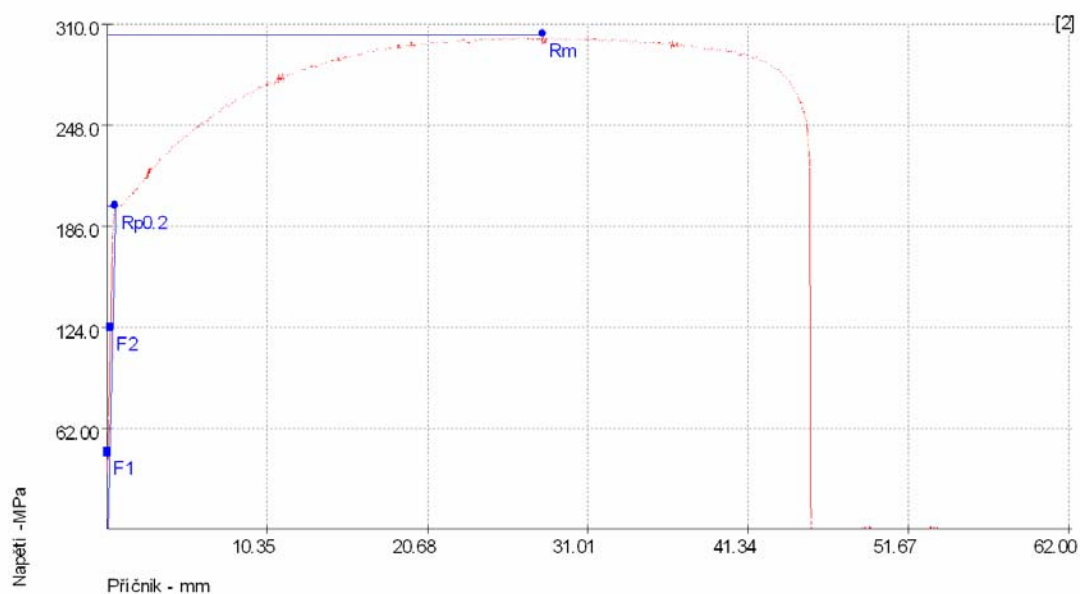
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: : DX53D+ZE      Zkušební norma : ČSN EN 10 0002-1  
Směr odebrání vzorku: : 45°      Datum testu : 3.4.2007  
Rozměr vzorku: : 20,1 x 0,81      Vypracoval: : Jan Wimmer  
Rychlost posuvu: : 10 mm/s

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>80</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	302.15	39.53	195.37
2	303.27	37.60	198.04
x	302.71	38.56	196.71
s	0.79	1.36	1.89

Zkouška 2



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

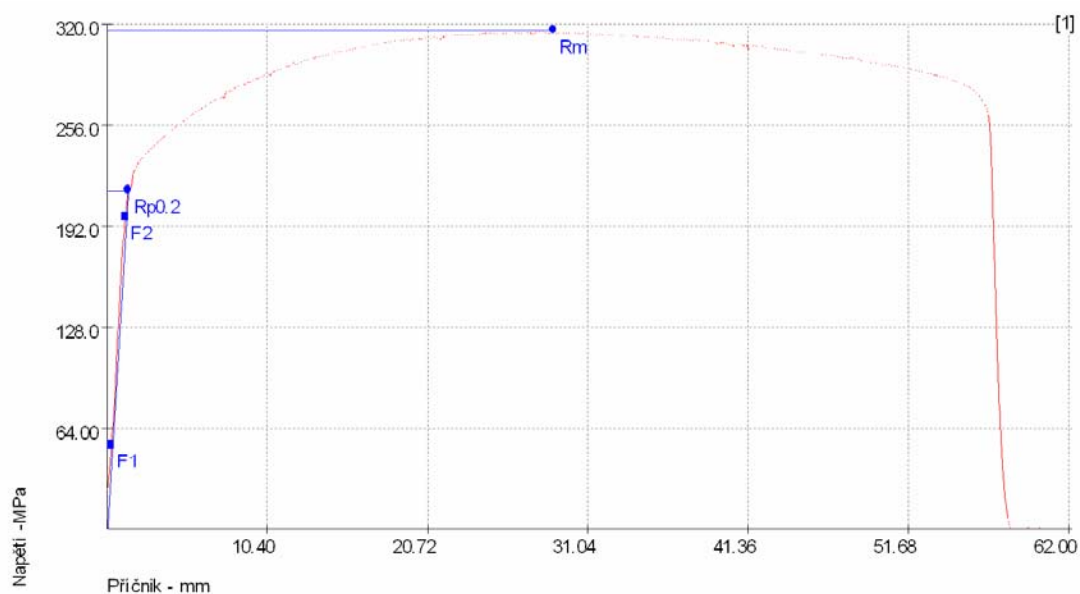
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: : DX53D+ZE      Zkušební norma : ČSN EN 10 0002-1  
Směr odebrání vzorku: : 45°      Datum testu : 3.4.2007  
Rozměr vzorku: : 20,1 x 0,81      Vypracoval: : Jan Wimmer  
Rychlost posuvu: : 50 mm/s

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>80</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	315.55	50.64	214.46
2	315.45	45.19	211.13
x	315.50	47.91	212.80
s	0.07	3.85	2.36

Zkouška 1



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

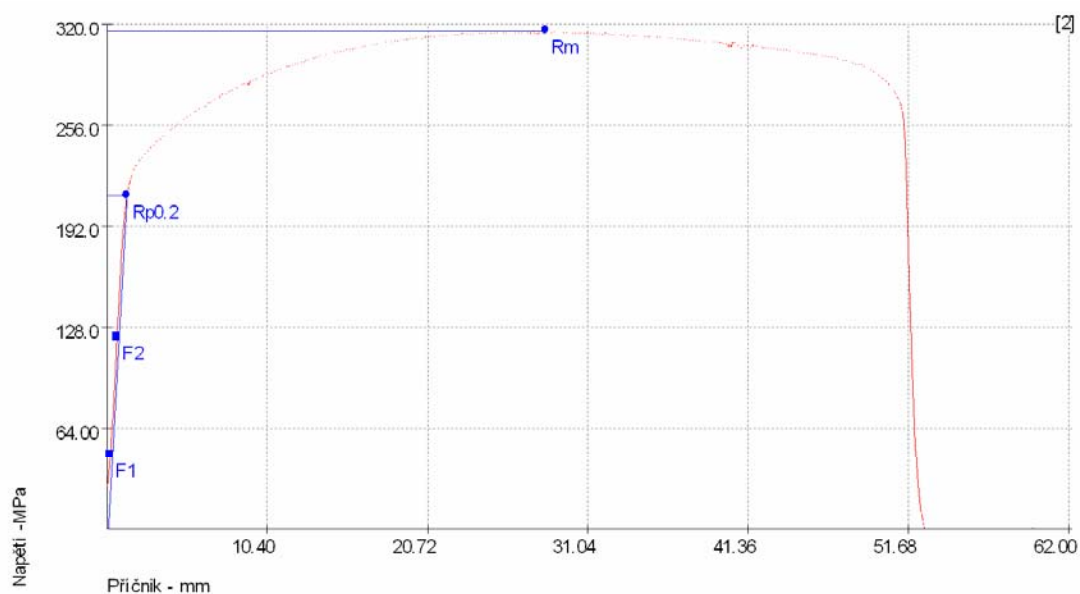
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	50 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	Rm MPa	A80 %	Rp0.2 MPa
1	315.55	50.64	214.46
2	315.45	45.19	211.13
x	315.50	47.91	212.80
s	0.07	3.85	2.36

Zkouška 2



Technická univerzita v Liberci FS  
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

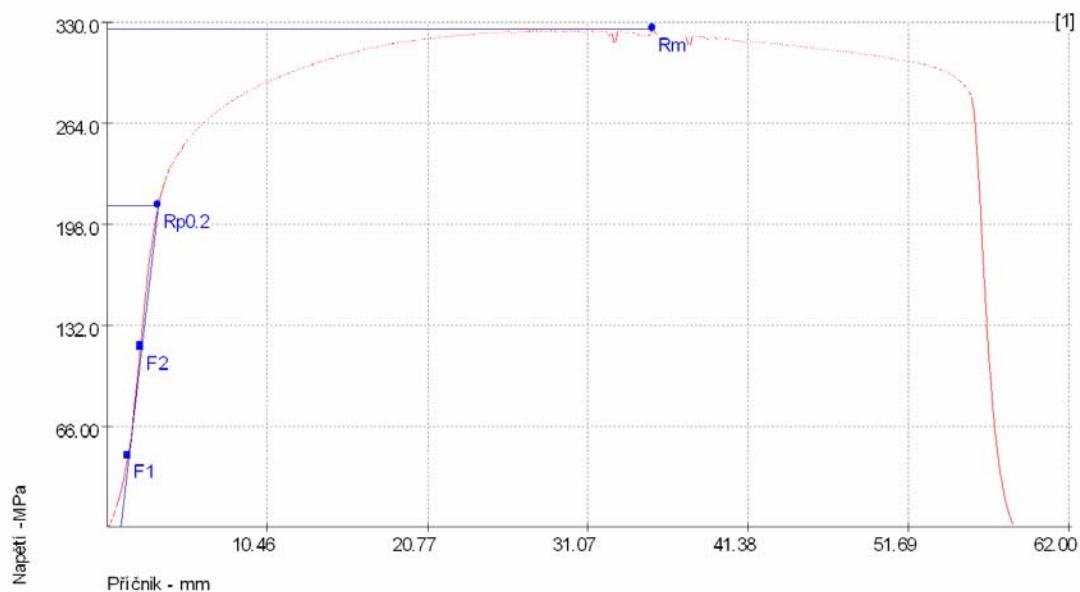
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: : DX53D+ZE      Zkušební norma : ČSN EN 10 0002-1  
Směr odebrání vzorku: : 45°      Datum testu : 3.4.2007  
Rozměr vzorku: : 20,1 x 0,81      Vypracoval: : Jan Wimmer  
Rychlost posuvu: : 100 mm/s

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>80</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	325.29	45.87	210.14
2	326.34	44.84	212.98
x	325.82	45.36	211.56
s	0.75	0.73	2.01

Zkouška 1



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

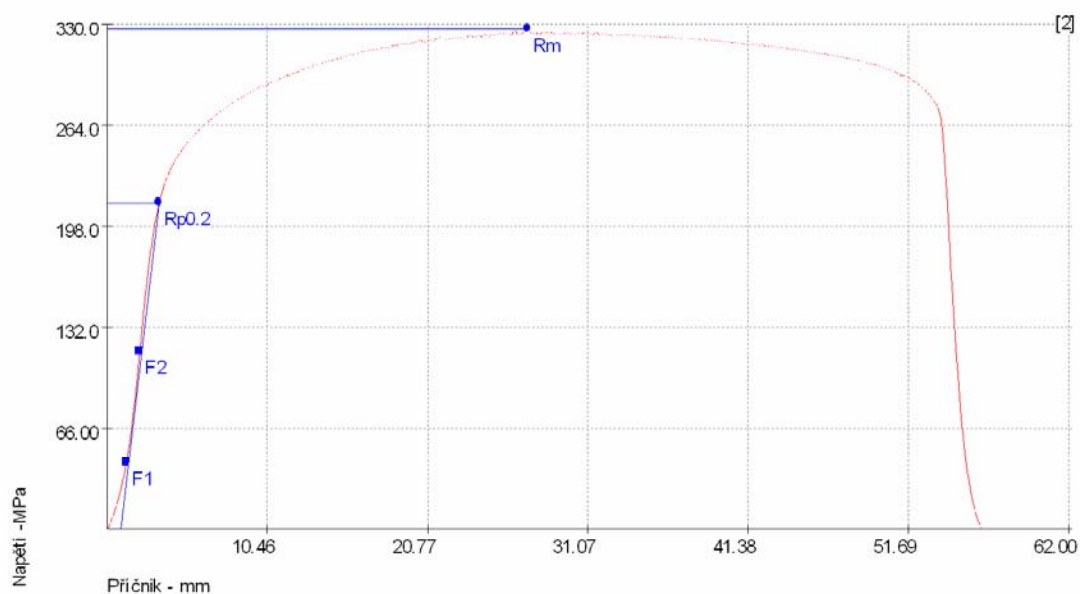
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	100 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>80</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	325.29	45.87	210.14
2	326.34	44.84	212.98
x	325.82	45.36	211.56
s	0.75	0.73	2.01

Zkouška 2



Technická univerzita v Liberci FS  
Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632



# Statická zkouška tahem

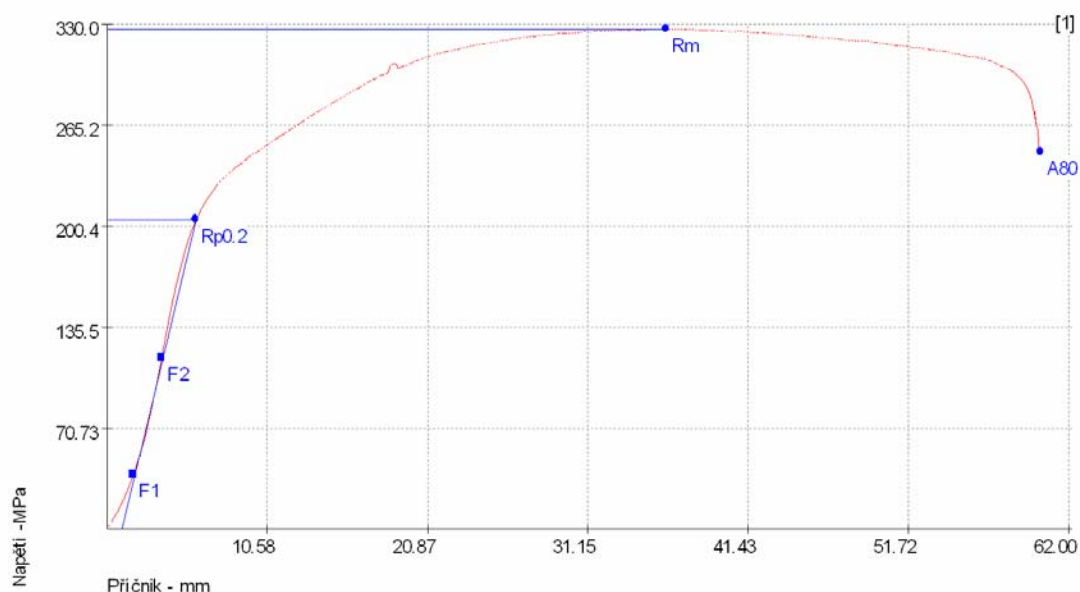
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	200 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>80</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	326.29	44.06	204.23
2	325.42	44.17	204.67
x	325.86	44.12	204.45
s	0.61	0.08	0.31

Zkouška 1



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632



# Statická zkouška tahem

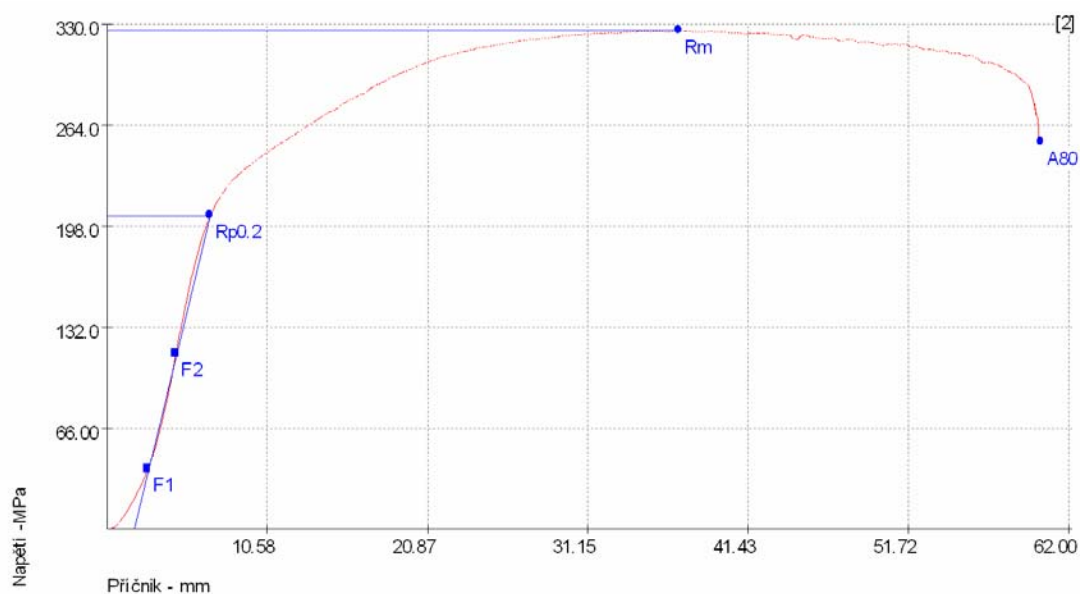
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	200 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>80</sub> %	R <sub>p0.2</sub> MPa
1	326.29	44.06	204.23
2	325.42	44.17	204.67
x	325.86	44.12	204.45
s	0.61	0.08	0.31

Zkouška 2



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

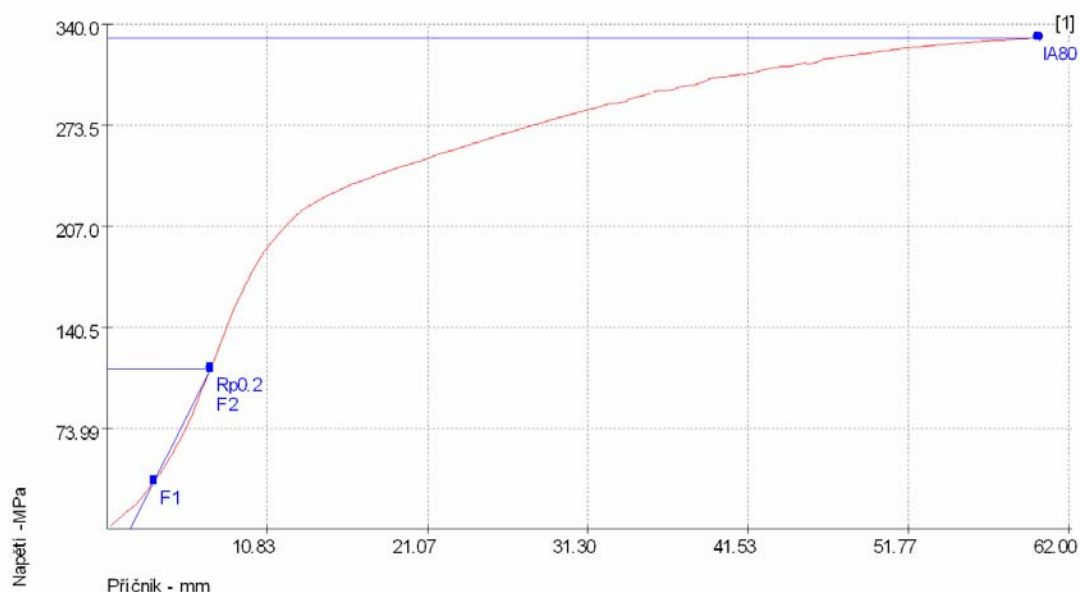
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	400 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	Rm MPa	A80 %	Rp0.2 MPa
1	330.91	46.91	113.20
2	332.57	45.17	112.56
x	331.74	46.04	112.88
s	1.18	1.23	0.45

Zkouška 1



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Statická zkouška tahem

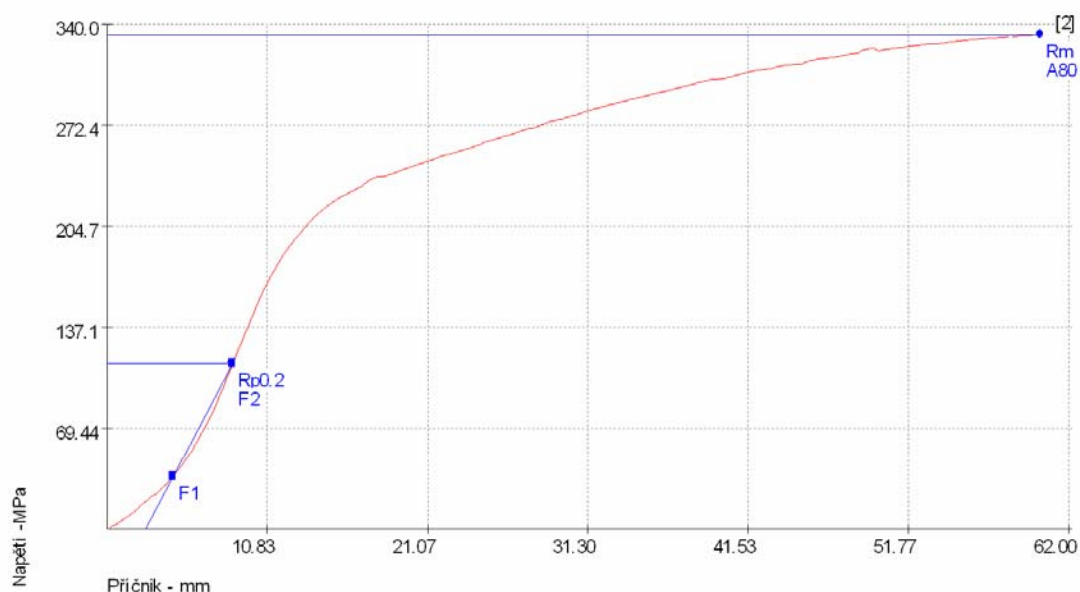
## Vstupní hodnoty

Název materiálu: :	DX53D+ZE	Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1
Směr odebrání vzorku: :	45°	Datum testu :	3.4.2007
Rozměr vzorku: :	20,1 x 0,81	Vypracoval: :	Jan Wimmer
Rychlost posuvu: :	400 mm/s		

## Výstupní hodnoty

Zkouška	Rm MPa	A80 %	Rp0.2 MPa
1	330.91	46.91	113.20
2	332.57	45.17	112.56
x	331.74	46.04	112.88
s	1.18	1.23	0.45

Zkouška 2



## Technická univerzita v Liberci FS Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů  
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1  
Ing. Pavel Doubek, Ph.D.  
e-mail: pavel.doubek@tul.cz  
Tel.: +420 485 353335, +420 604 843 632

# Technická univerzita v Liberci

## Katedra strojírenské technologie

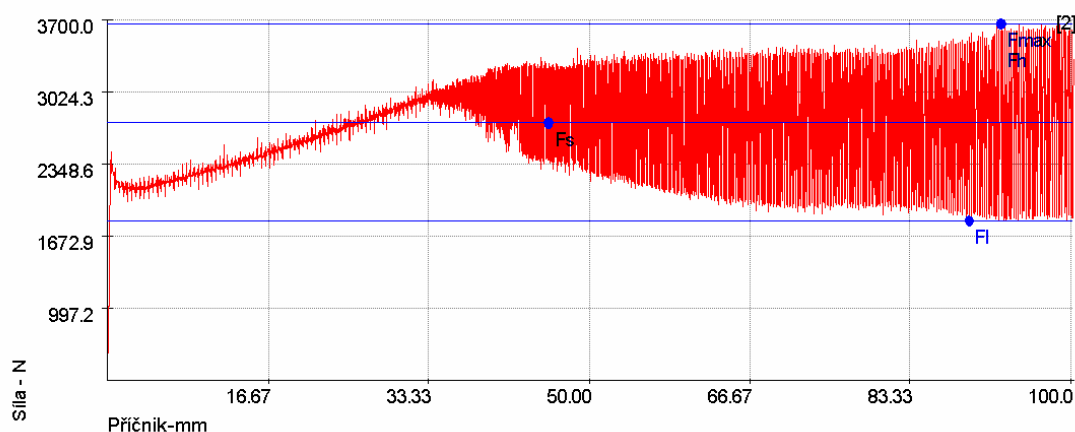
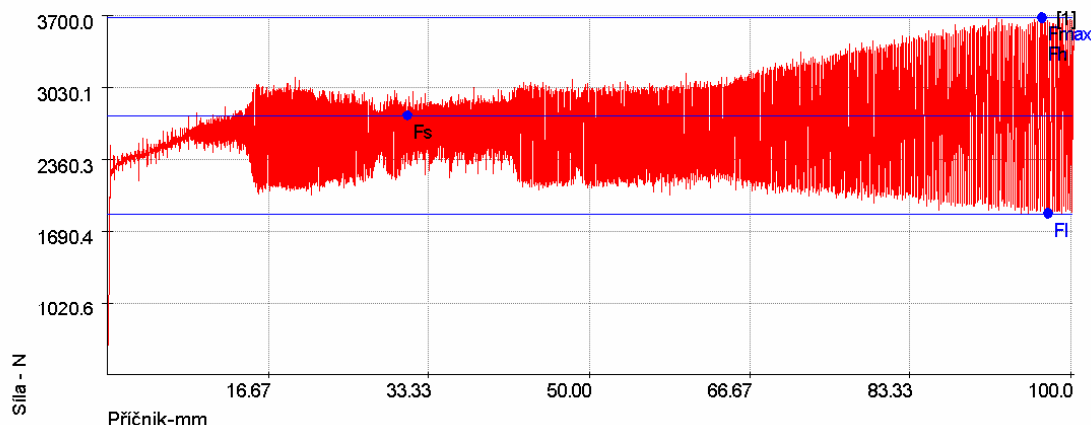
# Tribologie - Zkouška protahováním pásku

## Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm x 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	1 mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31 μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	3MPa	Měřená délka:	100mm

## Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	delta F N
1	3679	2767	1855	3679	1824
2	3660	2737	1813	3660	1848
x	3670	2752	1834	3670	1836
s	13.17	21.52	29.87	13.17	16.70



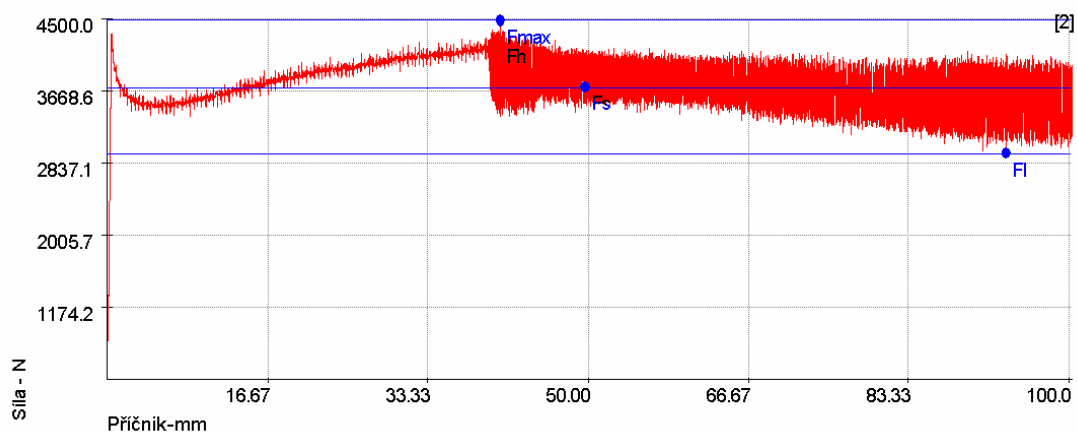
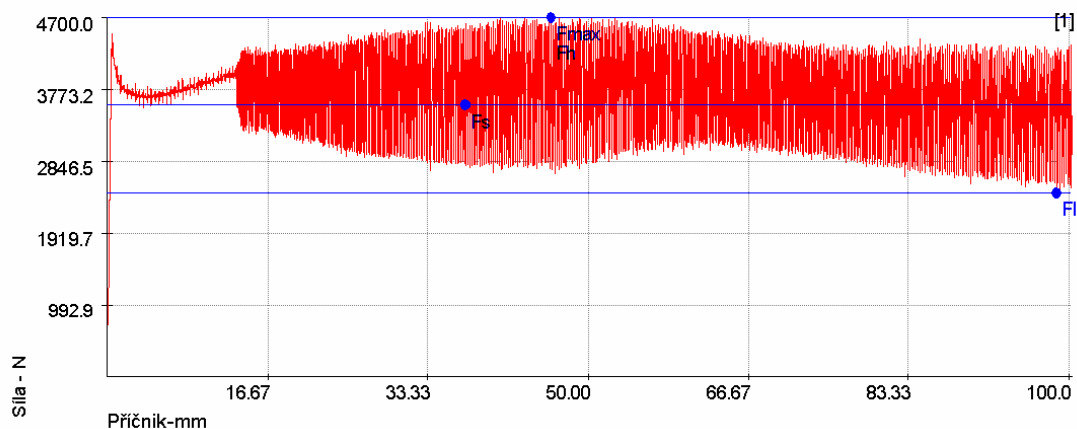
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	1 mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31 μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	5MPa	Měřená délka:	100mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	delta F N
1	4698	3569	2441	4698	2257
2	4481	3715	2949	4481	1532
x	4589	3642	2695	4589	1895
s	153.17	103.06	359.30	153.17	512.47



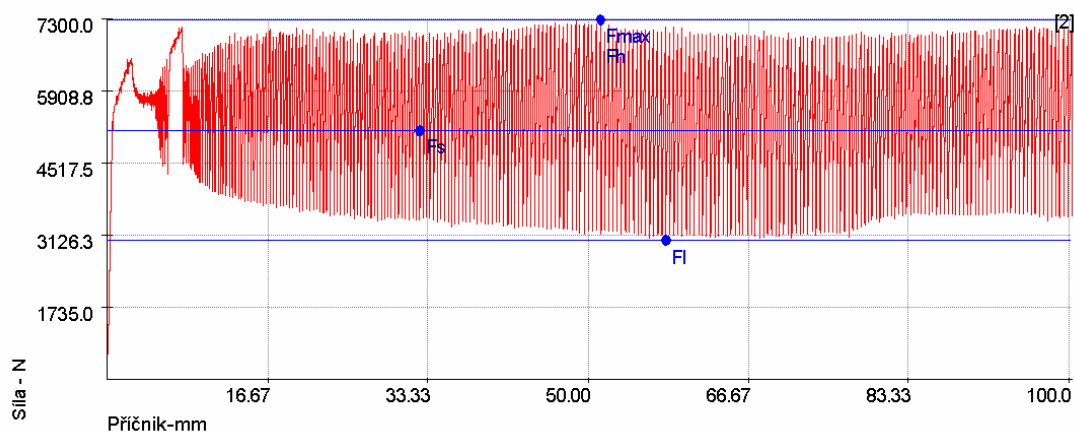
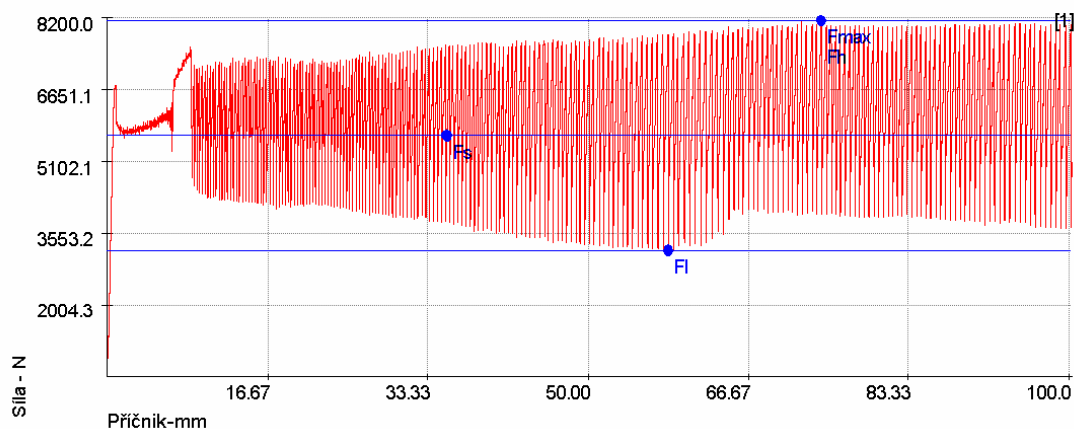
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	1 mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31 μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	7MPa	Měřená délka:	100mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	deltaF N
1	8127	5656	3185	8127	4942
2	7276	5149	3022	7276	4255
x	7702	5402	3103	7702	4599
s	601.49	358.42	115.35	601.49	486.14



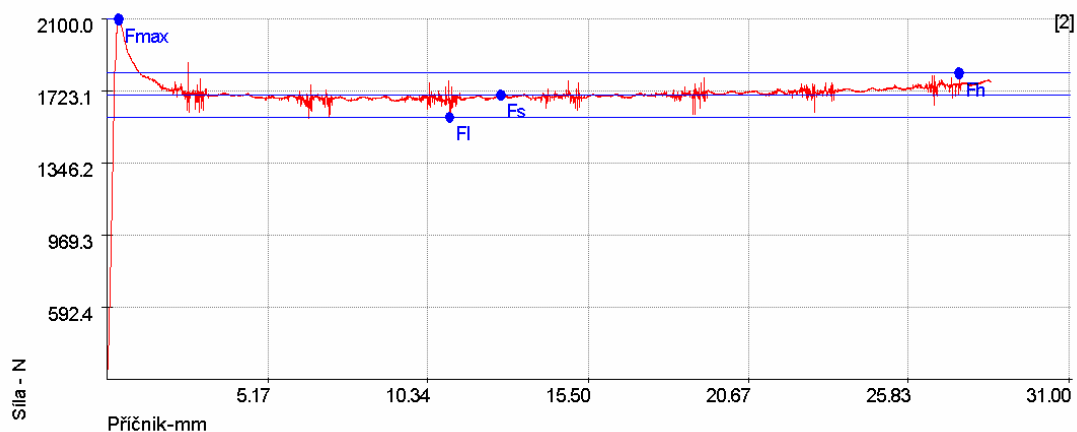
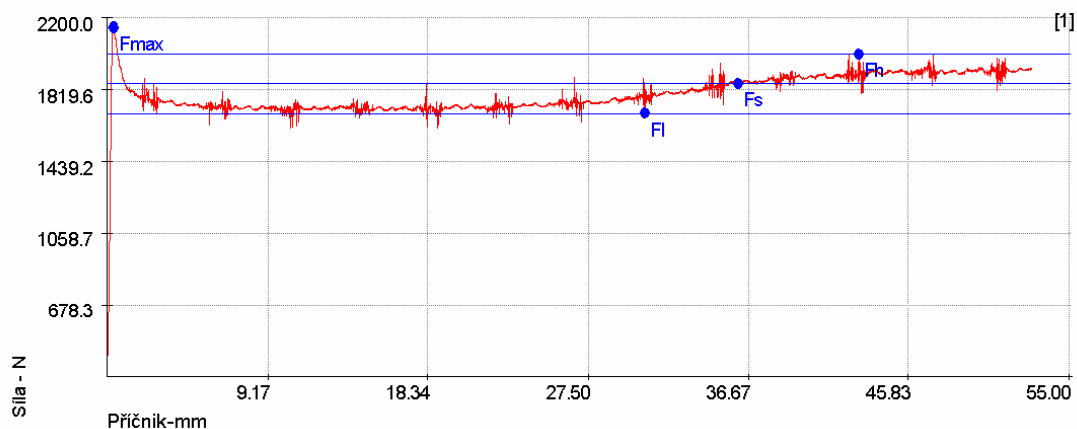
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	10mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	3MPa	Měřená délka:	100mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	delta F N
1	2147	1849	1693	2006	313
2	2098	1701	1586	1815	230
x	2123	1775	1639	1911	271
s	34.88	105.28	75.85	134.70	58.85



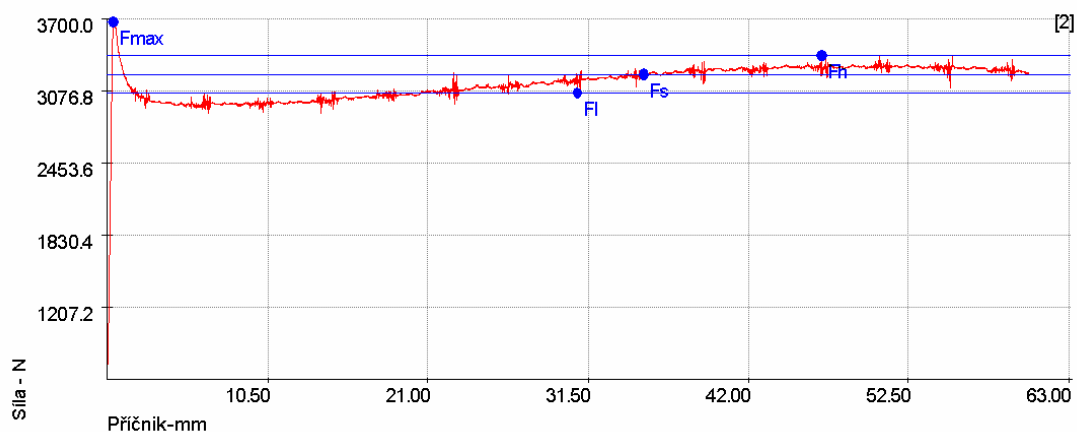
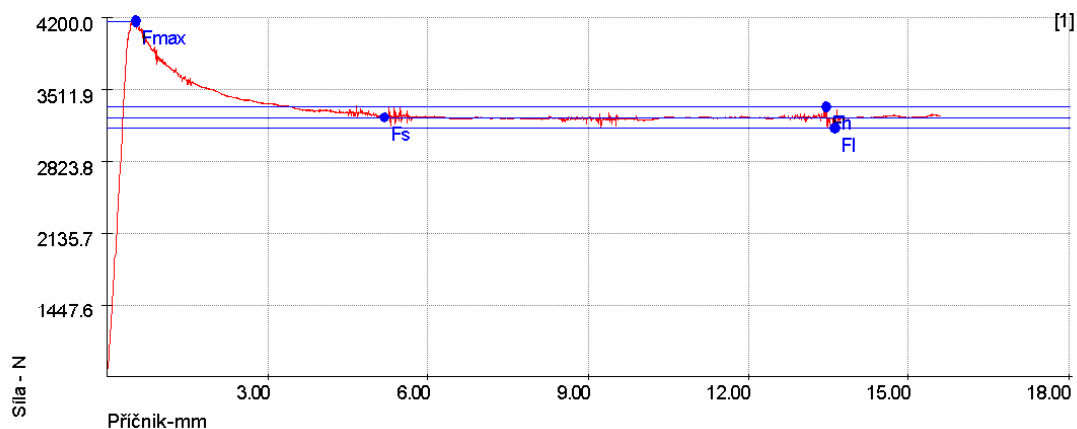
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	10mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	5MPa	Měřená délka:	100mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	delta F N
1	4162	3242	3140	3345	205
2	3671	3220	3058	3383	325
x	3917	3231	3099	3364	265
s	347.31	15.67	58.26	26.92	85.18





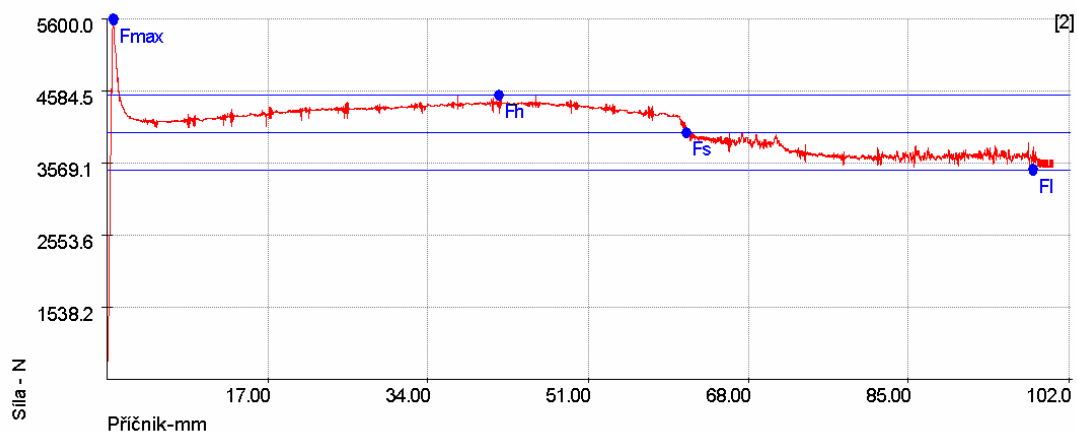
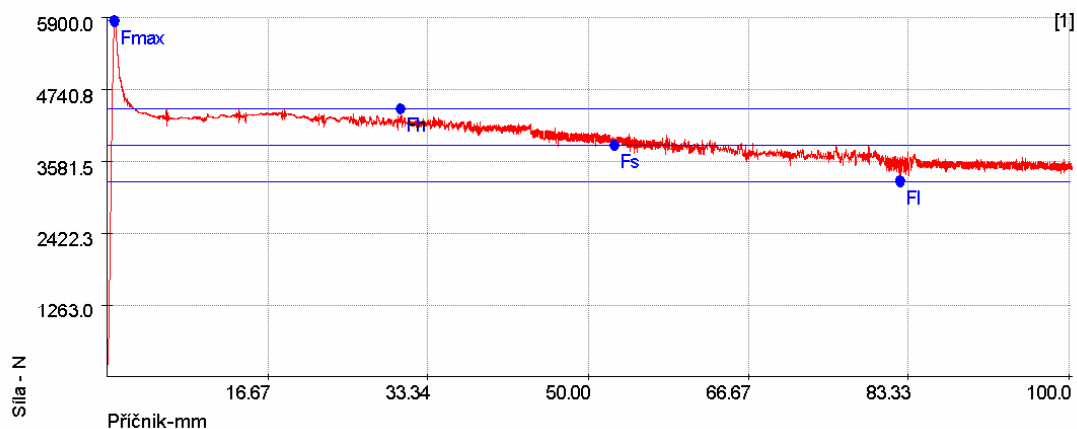
## Tribologie - Zkouška protahováním pásu

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	10 mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31 μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	7MPa	Měřená délka:	100mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	delta F N
1	5842	3838	3258	4419	1161
2	5594	4001	3473	4528	1055
x	5718	3920	3366	4474	1108
s	175.08	114.81	152.19	77.42	74.77



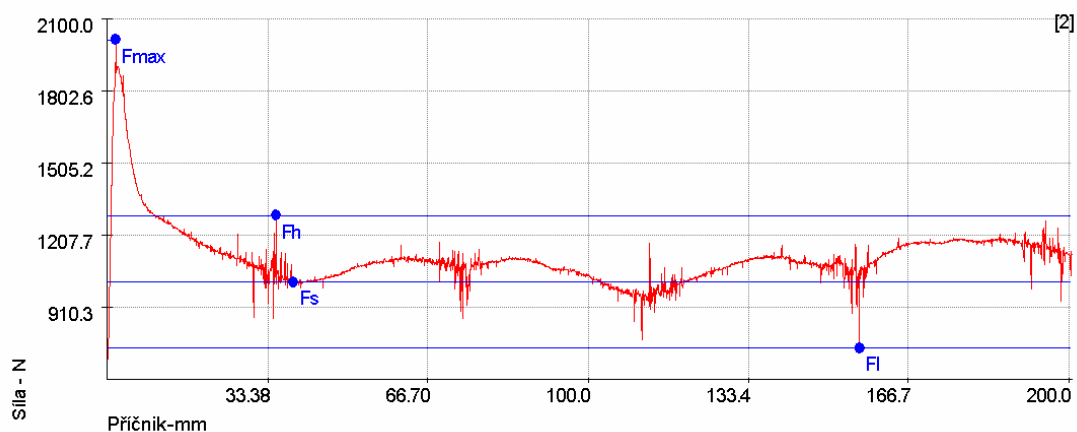
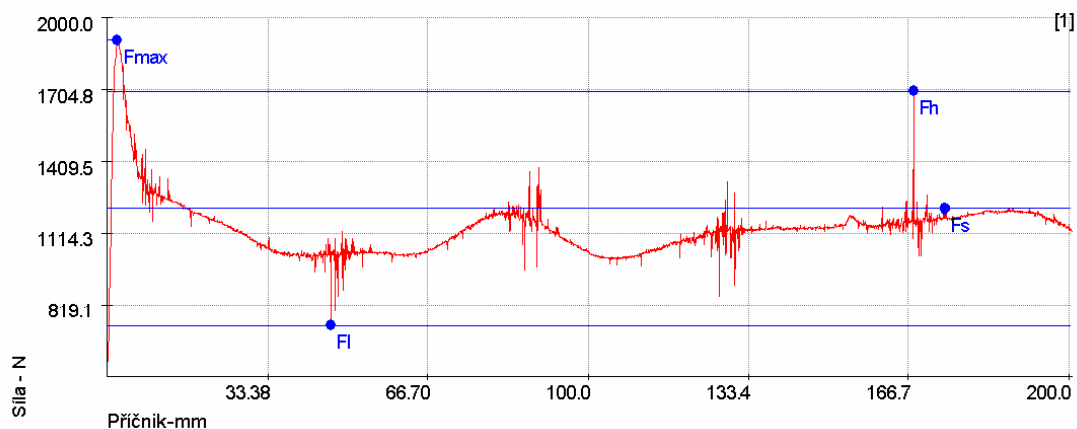
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	100mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	3MPa	Měřená délka:	200mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	delta F N
1	1906	1215	733	1698	965
2	2014	1015	742	1289	547
x	1960	1115	737	1493	756
s	76.24	141.28	6.29	288.86	295.14



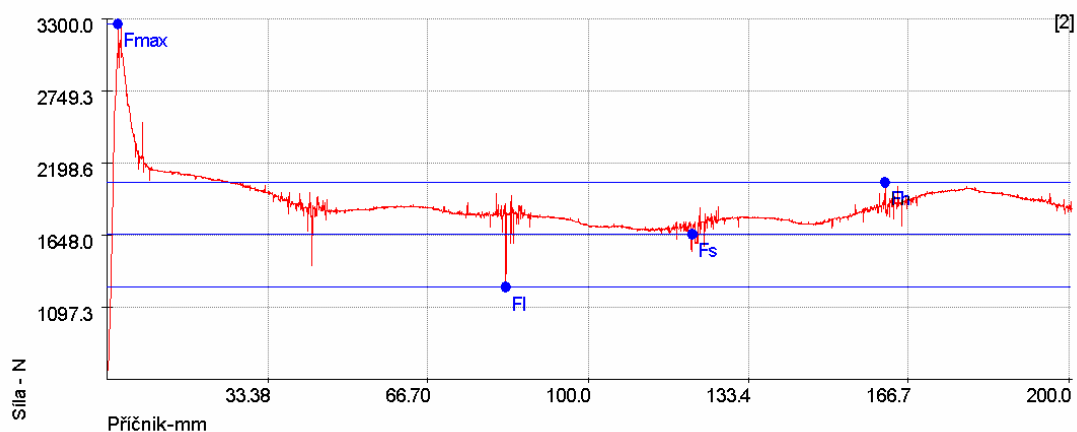
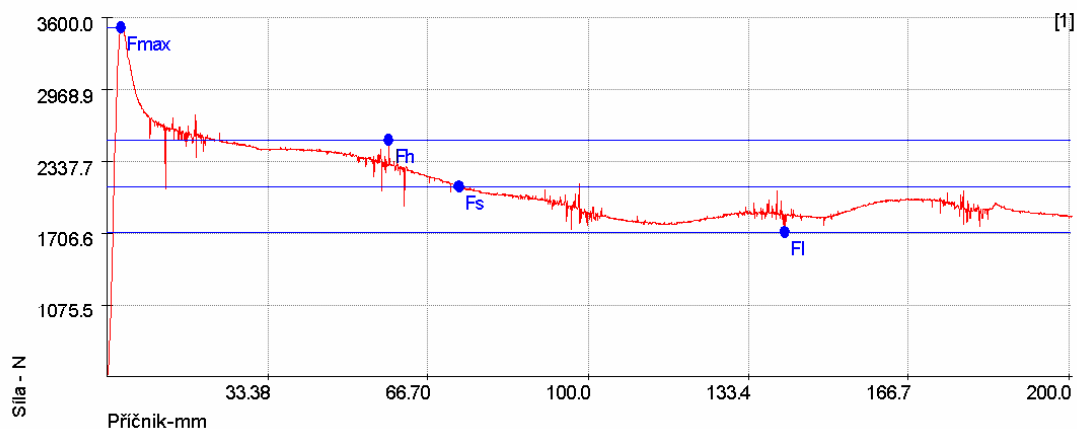
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	100mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	5MPa	Měřená délka:	200mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	deltaF N
1	3513	2118	1714	2521	807
2	3260	1651	1252	2050	798
x	3386	1884	1483	2286	803
s	178.62	330.22	326.98	333.46	6.48



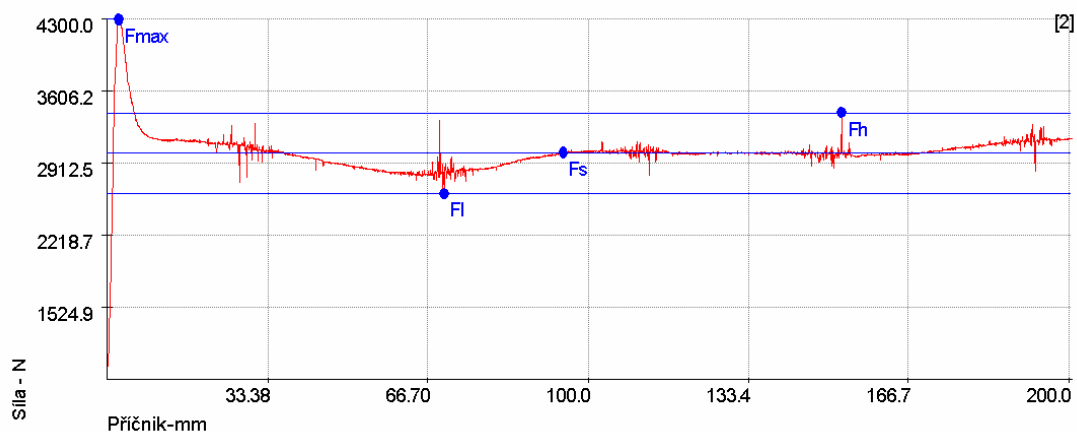
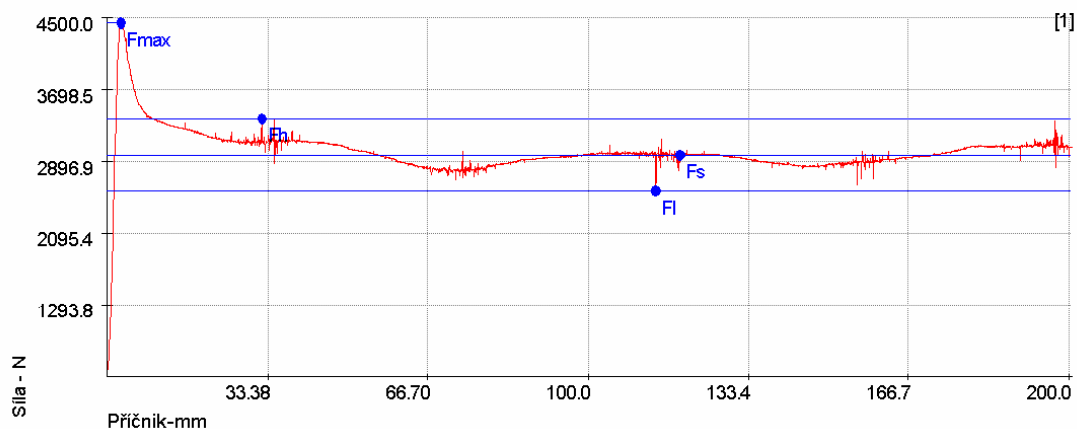
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	100mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	7MPa	Měřená délka:	200mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	delta F N
1	4433	2965	2562	3367	805
2	4297	3009	2620	3398	778
x	4365	2987	2591	3382	791
s	96.28	31.19	40.87	21.52	19.36



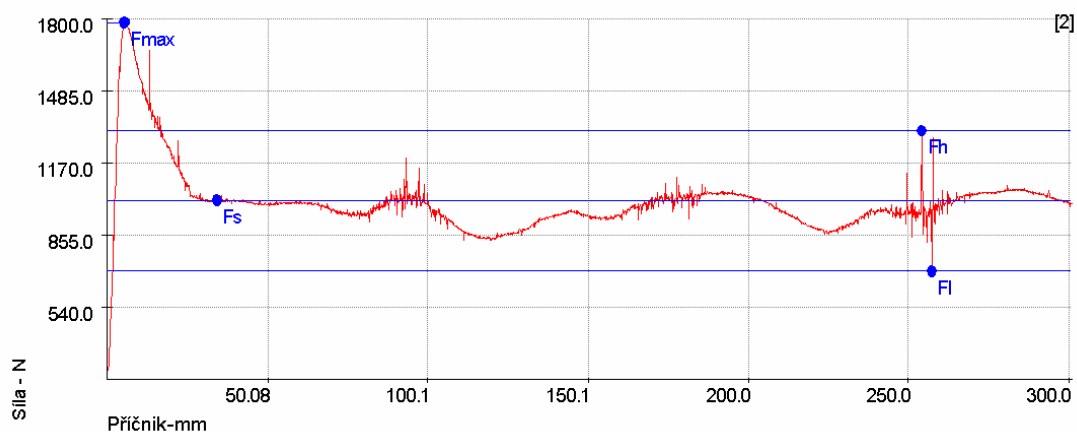
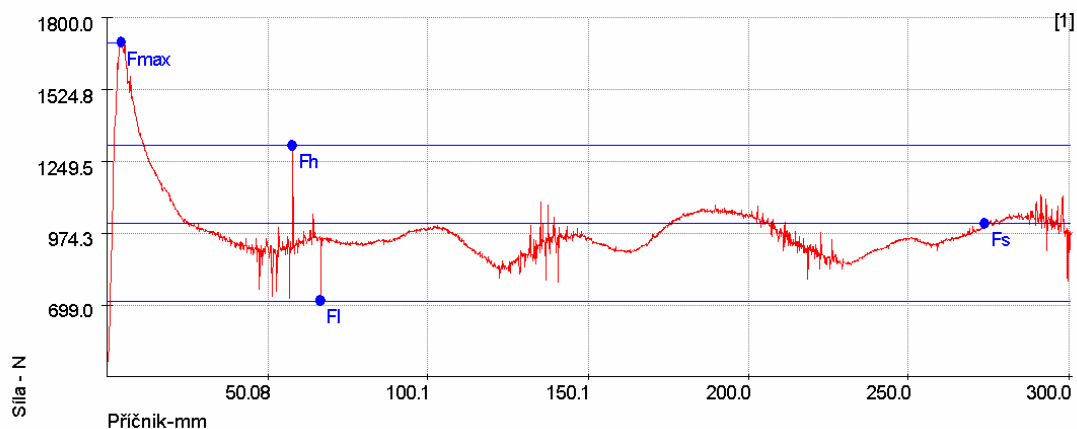
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	200mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	3MPa	Měřená délka:	300mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	deltaF N
1	1704	1012	716	1308	593
2	1784	1006	699	1313	614
x	1744	1009	707	1311	603
s	56.89	4.32	11.99	3.34	15.33



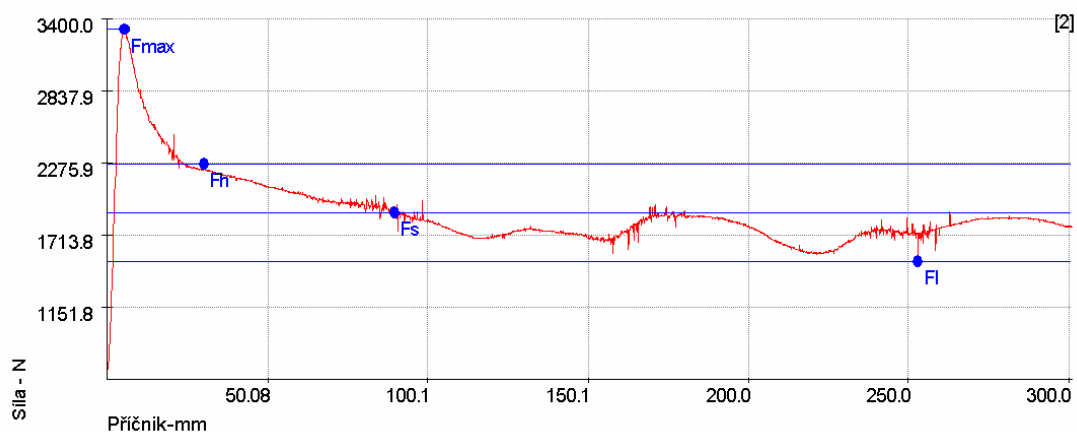
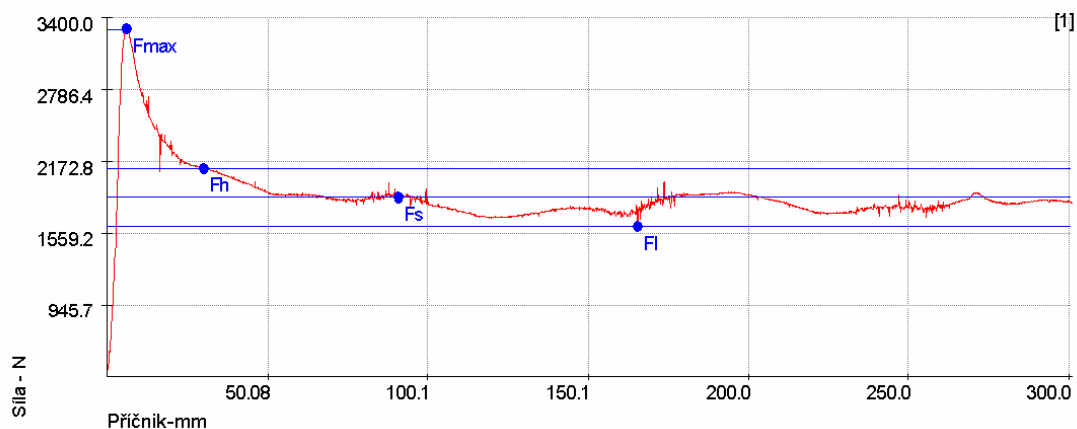
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	200mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GCG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	5MPa	Měřená délka:	300mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	delta F N
1	3301	1864	1615	2112	497
2	3319	1888	1509	2267	758
x	3310	1876	1562	2190	628
s	12.77	17.34	74.97	109.65	184.61



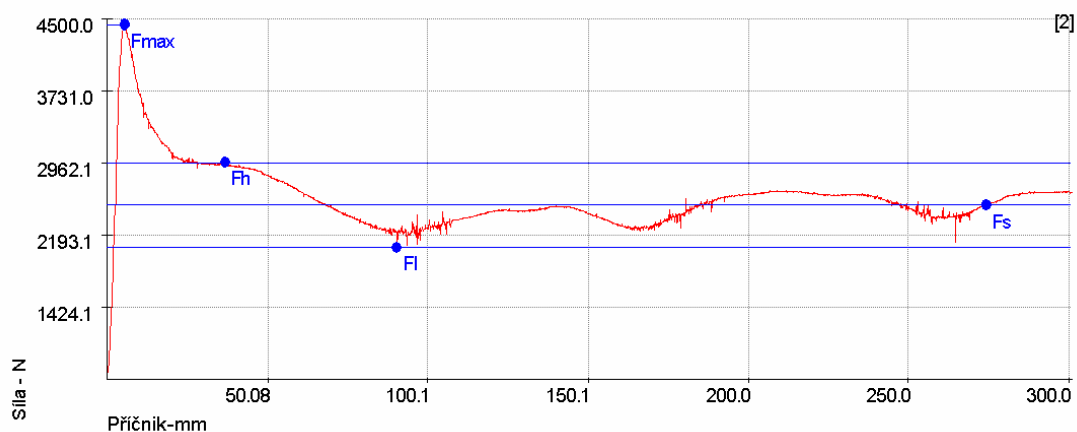
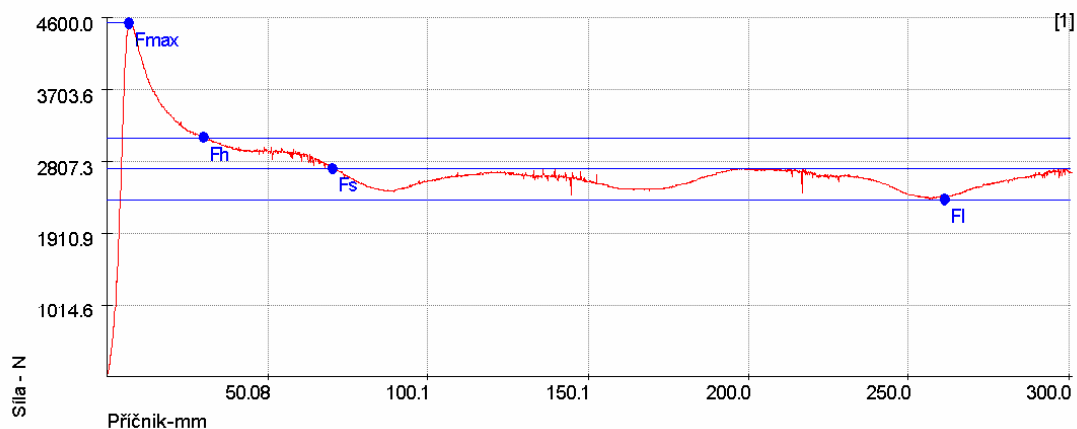
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	200mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	7MPa	Měřená délka:	300mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	delta F N
1	4528	2716	2327	3104	777
2	4439	2515	2062	2967	905
x	4483	2615	2195	3036	841
s	62.78	141.82	187.27	96.38	90.88



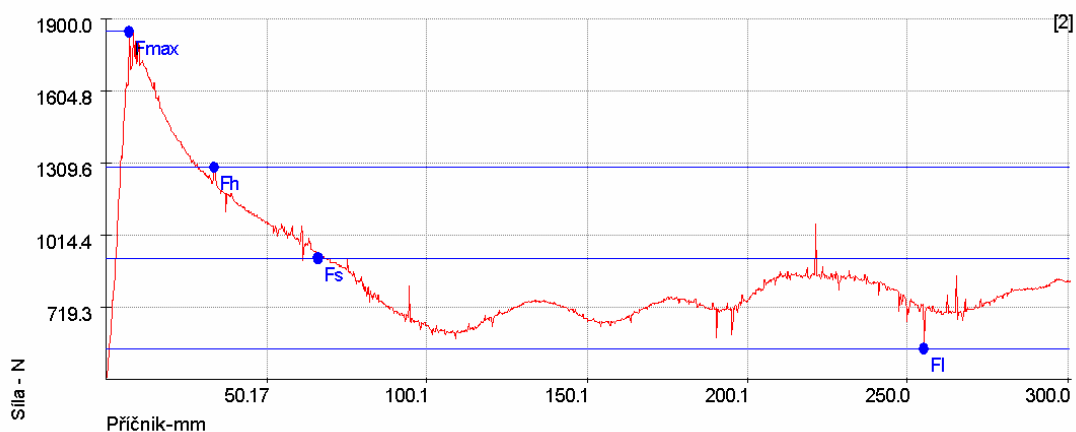
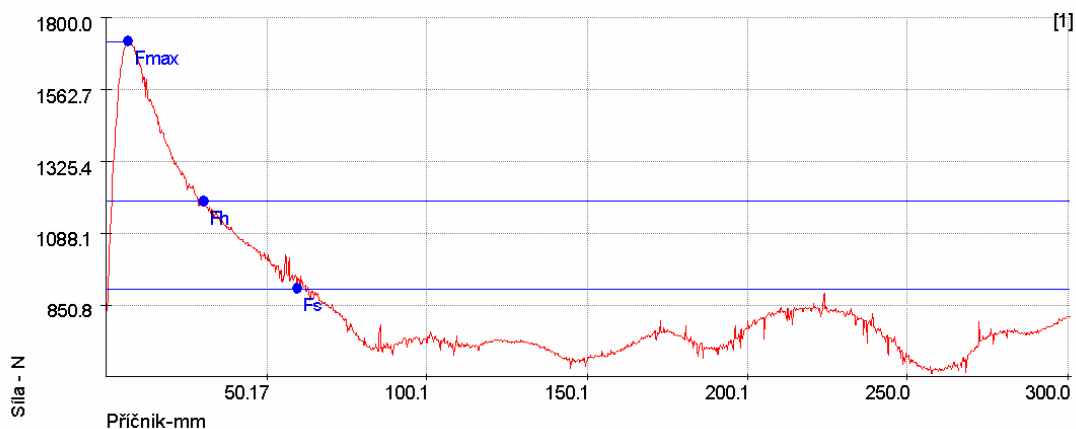
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	400mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	3MPa	Měřená délka:	300mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	delta F N
1	1721	903	613	1193	580
2	1848	920	550	1291	742
x	1784	912	581	1242	661
s	90.19	12.18	45.19	69.56	114.76





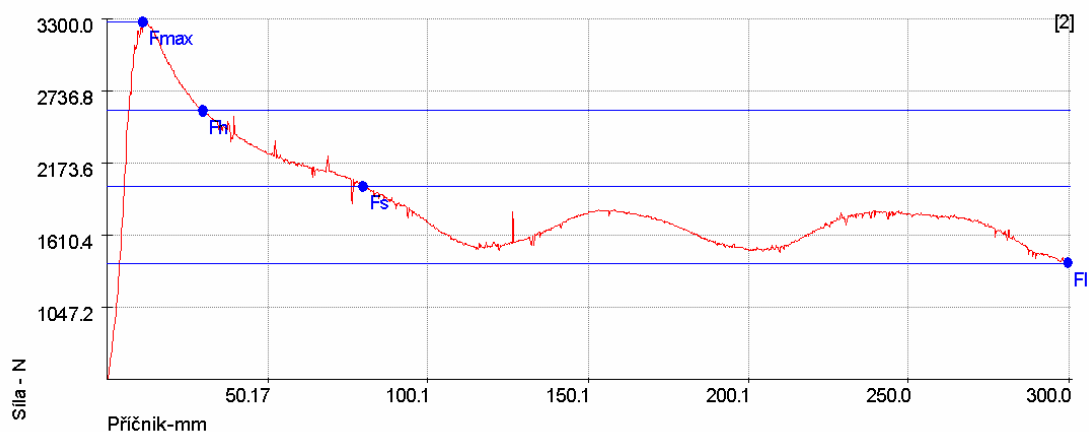
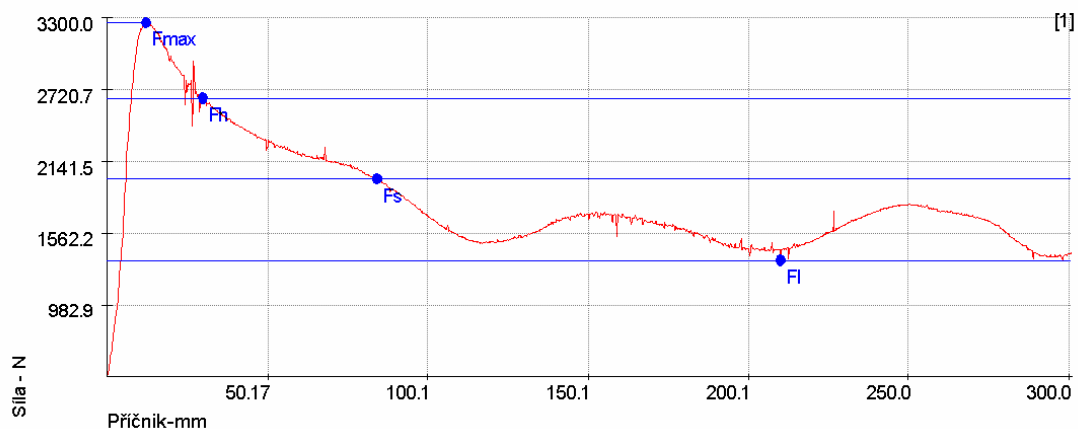
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	400mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31 μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GGG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	5MPa	Měřená délka:	300mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	delta F N
1	3256	1995	1342	2647	1305
2	3273	1987	1393	2582	1189
x	3265	1991	1368	2615	1247
s	11.69	5.31	35.96	46.57	82.53



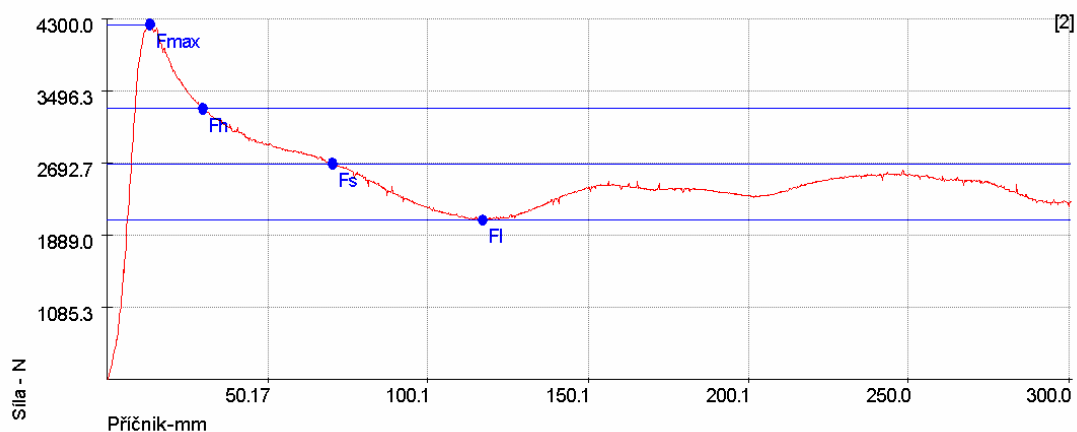
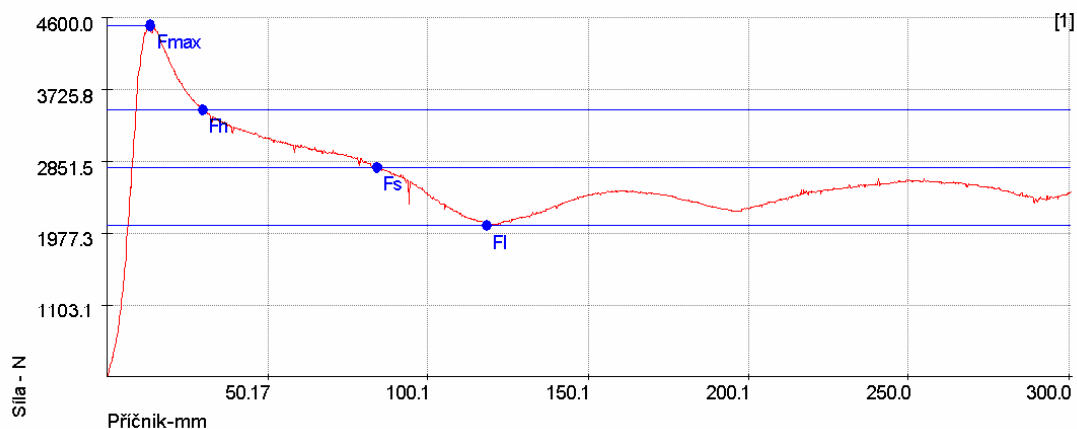
## Tribologie - Zkouška protahováním pásku

### Vstupní hodnoty

Testované mazivo:	Anticorit380239-LV	Kontaktní plocha:	78 mm × 40 mm
Množství maziva:	1,5g/m <sup>2</sup>	Rychlost posuvu:	400mm/s
Testovaný substrát:	DX53D+ZE	Varianta:	1B
Drsnost povrchu:	Ra=1,23/1,31μm PC=86/921/cm	Teplota:	0°C
Materiál nástroje:	GCG70L	Rychlost snímání dat:	2kHz
Kontaktní tlak:	7MPa	Měřená délka:	300mm

### Výstupní hodnoty

Zkouška	F <sub>max</sub> N	F <sub>s</sub> N	F <sub>I</sub> N	F <sub>h</sub> N	delta F N
1	4503	2772	2069	3476	1407
2	4233	2679	2056	3302	1246
x	4368	2726	2062	3389	1327
s	190.80	65.93	8.84	123.01	114.17



### **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména §60 školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 25.5.2007

Podpis:

### **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 25.5.2007

Signature: